



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

CFD SIMULACE PORYVU BOČNÍHO VĚTRU

CFD SIMULATION OF A CROSSWIND GUST

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Kroupa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Čavoj

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Michal Kroupa**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Čavoj**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

CFD simulace poryvu bočního větru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro přesnější posouzení citlivosti vozidla na boční vítr je nutné simulovat poryv větru v závislosti na čase. Při běžných stacionárních výpočtech, kdy je vozidlo vystaveno konstatnímu úhlu náběhu proudění, může docházet k podhodnocení silových účinků.

Cíle diplomové práce:

Sestavení výpočetní sítě vhodné pro simulaci poryvu bočního větru.

Provedení stacionárního výpočtu s bočním větrem.

Sestavení okrajové podmínky, která simuluje poryv bočního větru postupující výpočetní doménou.

Srovnání silových účinků na vozidlo ve stacionárním a nestacionárním výpočtu.

Seznam literatury:

THEISSEN, P. Unsteady Vehicle Aerodynamics in Gusty Crosswind [online]. München, 2012 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: <http://mediatum.ub.tum.de/?id=1096026>

FAVRE, T. Aerodynamics simulations of ground vehicles in unsteady crosswind [online]. Stockholm, 2011 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:461388/FULLTEXT01.pdf>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá zkoumáním nestacionárních aerodynamických jevů při průjezdu vozidla poryvem bočního větru. V první části byla pro CFD simulace vytvořena funkce popisující průběh boční složky rychlosti v čase a prostoru. V další části byl srovnán kontinuální poryv s trapézovým poryvem. Srovnání nestacionárních a kvazi-stacionárních průběhů aerodynamických silových účinků pomocí anulovaných sil, povrchového tlaku vozidla a proudového pole kolem vozidla bylo úkolem další části. V předposlední části bylo zkoumáno nestacionární chování odporové síly a na závěr byl zkoumán vliv zadní části geometrie na nestacionární jevy.

KLÍČOVÁ SLOVA

boční vítr, CFD, poryv větru, nestacionární jevy

ABSTRACT

This thesis deals with the investigation of unsteady effects on vehicle that has been exposed to a crosswind gust. First crosswind velocity function was created, which is a function of both time and space. A comparison of continual and trapeze gust model was carried out. Next step was to compare unsteady and quasi-steady evolution of the aerodynamic loads using accumulated forces, surface pressures and flow field around the car. The penultimate part deals with investigation of unsteady behaviour of drag and in the last part the influence of rear geometry of the car on unsteady phenomena was investigated.

KEYWORDS

crosswind, CFD, gust, unsteady phenomena

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KROUPA, M. *CFD simulace poryvu bočního větru*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 52 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Čavoj.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ondřeje Čavoje a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Michal Kroupa

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl velmi poděkovat panu Ing. Ondřeji Čavojovi za jeho vedení, pomoc a cenné rady při zpracovávání mé diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat mé manželce Johance za velkou podporu během uplynulého roku.

OBSAH

Úvod	9
1 Definice	10
1.1 Souřadný systém	10
1.2 Definice bočního větru.....	11
1.3 Koeficienty aerodynamických sil a momentů	11
2 Současný stav poznání.....	12
2.1 Boční vítr	12
2.2 Vliv geometrie zadní části vozidla.....	14
2.3 Nastavení poryvu bočního větru	17
3 Metodologie.....	19
3.1 Geometrie.....	19
3.2 Výpočetní objem.....	20
3.3 Síť	20
3.4 Numerické nastavení.....	21
3.5 Poryv bočního větru.....	22
3.6 Srovnání kontinuálního a trapézového poryvu	25
4 Nestacionární jevy během poryvu bočního větru	28
4.1 Průběhy aerodynamických silových účinků	28
4.2 Rozložení tlaku na povrchu vozidla.....	34
4.3 Proudové pole	37
4.4 Nestacionární mechanismus	41
4.5 Nestacionární chování odporové síly.....	42
5 Vliv geometrie zadní části vozidla na nestacionární jevy	45
Závěr.....	49
Seznam použitých zkratk a symbolů	52

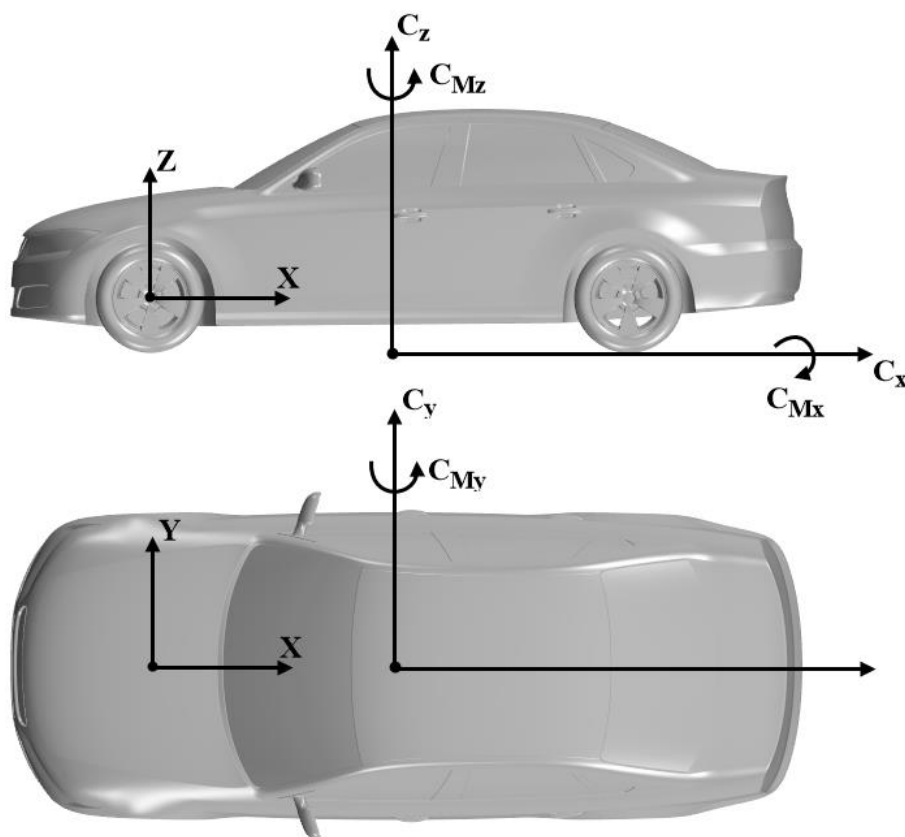
ÚVOD

Zkoumání citlivosti vozidel na boční vítr je důležité hlavně pro bezpečnost jízdy a komfort cestujících. Vzhledem ke zvyšujícím se rychlostem vozidel, které jsou způsobeny stále se snižující hmotností a snižováním aerodynamického odporu za účelem snížení spotřeby, se zvyšuje také potřeba zabývat se vlivem aerodynamických silových účinků na dynamiku vozidla. Tato vozidla sice mají nižší požadovaný aerodynamický odpor a tím pádem i dobré jízdní vlastnosti v přímém směru, ale stávají se citlivější na boční vítr. Současné trendy směřují k vyšším vozidlům, jako jsou SUV, které mají větší boční průřez a vyšší polohu těžiště. To má negativní vliv na jejich stabilitu během bočního větru. Řidič vozidla, které je citlivé na boční vítr, musí mnohem častěji provádět korekce volantem během poryvů bočního větru, zejména při vysokých rychlostech na dálnici. Stabilita vozidla na boční vítr není parametrem, podle kterého by zákazník při koupi nového vozu vybíral, ale je důležitým parametrem bezpečnosti. Zákazník si nekoupí vozidlo, pokud se v něm nebude cítit bezpečně.

Poryvy bočního větru mohou nastat například když vozidlo vyjede ze závětrí do proudu vzduchu, který se objeví za překážkou. Aby mohla být vyráběna vozidla, která jsou stabilní při poryvech bočního větru, musí být v první řadě identifikovány aerodynamické jevy, které se v těchto situacích objevují. Proto vznikají experimentální a numerické metody, díky kterým můžeme zkoumat aerodynamické chování vozidel během poryvů bočního větru a případně provést úpravy karoserie už v brzkém stádiu vývoje vozidla. Simulace pomocí Počítačové dynamiky tekutin (Computational Fluid Dynamics – CFD) nabízí levný (oproti nákladným experimentům) a se zvyšováním výkonů počítačů také rychlý způsob zkoumání proudění vzduchu kolem obtékaného vozidla. CFD simulace umožňují zkoumat velké množství různých situací, jako například poryv bočního větru na vozidlo jedoucí vysokou rychlostí.

Tato práce se zabývá simulacemi poryvu bočního větru na reálné geometrii vozidla. Poryv větru zde byl modelován pomocí časově závislých okrajových podmínek, které umožní se ještě více přiblížit reálným podmínkám, ve kterých se může vozidlo nacházet.

1 DEFINICE



Obr. 1.1 Souřadný systém, umístění referenčního bodu v polovině rozvoru a jednotlivé aerodynamické koeficienty.

1.1 SOUŘADNÝ SYSTÉM

Souřadný systém je umístěn v polovině rozchodu kol přední nápravy (Obr. 1.1). Osa x směřuje k zadní části vozidla, osa y ke spolujezdci a osa z směřuje nahoru ze střechy vozidla. Koeficienty jednotlivých aerodynamických silových účinků byly počítány k referenčnímu bodu, který leží na ose x na vozovce v polovině rozvoru vozidla (Obr. 1.1).



Obr. 1.2 Definice bočního větru.

1.2 DEFINICE BOČNÍHO VĚTRU

V této práci je boční vítr definován, jako rychlost V_y kolmá na podélnou rychlost vozidla V_x . Vozidlo se ovšem při simulacích nepohybuje. Pohybuje se vzduch kolem vozidla a z toho důvodu je rychlost V_x spíše rychlostí hlavního proudu vzduchu. Úhel náběhu β roste s rostoucí složkou boční rychlosti V_y (Obr. 1.2).

1.3 KOEFICIENTY AERODYNAMICKÝCH SIL A MOMENTŮ

Aerodynamické síly jsou vytvářeny změnou tlaku kolem vozidla a třením tekutiny na povrchu vozidla, které tekutinou projíždí. Kvůli tomu, že výsledné síly působí v bodě, který je rozdílný od těžiště vozidla, jsou vytvářeny také aerodynamické momenty. Komponenty aerodynamických silových účinků rozloženy do os souřadného systému vozidla, jsou: odporová síla ve směru osy x , boční síla ve směru osy y a vztlaková síla ve směru osy z . Složky momentů jsou definovány podle pravidla pravé ruky. Moment klopení kolem osy x , moment klonění kolem osy y a moment stáčení kolem osy z . Bezrozměrné koeficienty sil a momentů jsou definovány jako [2], [5]:

$$C_F = \frac{F}{\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A\right)} \quad (1)$$

$$C_M = \frac{M}{\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot l\right)}, \quad (2)$$

kde F je síla (odporová, vztlaková a boční síla), M je moment (moment klopení, klonění a stáčení), ρ je hustota vzduchu, A je průmět čelní plochy na rovinu za vozidlem, l je rozvor a V je výsledná rychlost pro kterou platí:

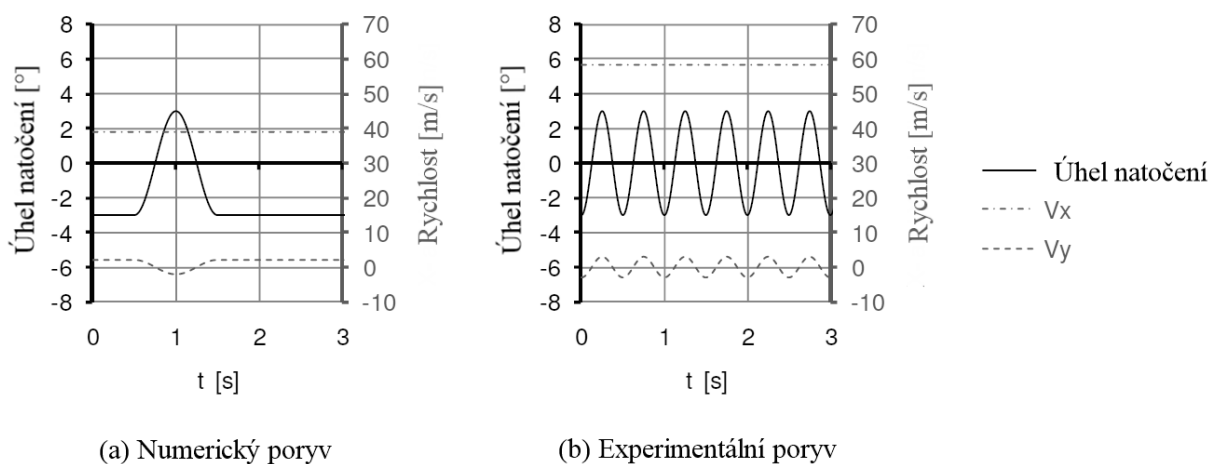
$$V = \sqrt{(V_x^2 + V_y^2)}. \quad (3)$$

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

2.1 BOČNÍ VÍTR

Theissen [1] zkoumal nestacionární průběhy aerodynamických silových účinků reálné geometrie vozidla BMW za použití časově závislých okrajových podmínek. Pomocí numerického přístupu identifikoval nestacionární jevy, vyskytující se během poryvu bočního větru, a potom je potvrdil experimentem. Pro numerický výpočet modeloval jednovrcholový poryv větru jako sinusovou změnu úhlu natočení vozidla kolem jeho svislé osy od -3° do $+3^\circ$ s frekvencí 1 Hz a rychlostí vozidla 140 km/h. Podélná rychlost proudu vzduchu kolem vozidla byla konstantní a změnu úhlu natočení vozidla docílil změnou boční složky rychlosti vzduchu pomocí funkce sinus (Obr. 2.1 vlevo). To vedlo k pulzu bočního větru, který procházel přes vozidlo a celým objemem. Numerické výpočty prováděl pomocí metody Lattice Boltzmann v programu PowerFlow 4.1. Správnost numerických výpočtů ověřil experimentem. Pro experiment použil kontinuální sinusový poryv větru (Obr. 2.1 vpravo). Vozidlo bylo natáčeno kolem své svislé osy $\pm 3^\circ$ s frekvencí 2 Hz ve volném proudu aerodynamického tunelu s rychlostí vzduchu 280 km/h.

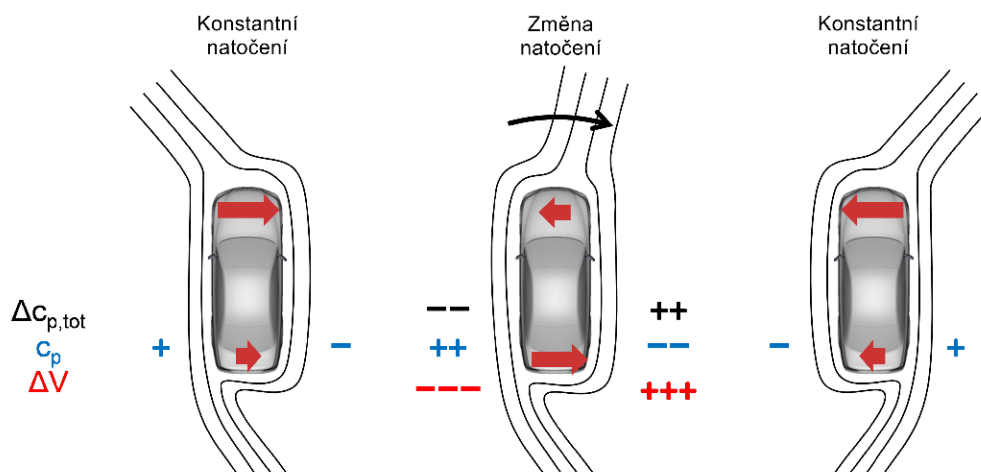
Zjistil, že odchylky nestacionární odporové síly, vztahové síly a momentu klonění jsou oproti kvazi-stacionárním hodnotám malé. Proto mohou být průběhy těchto aerodynamických silových účinků odhadnuty kvazi-stacionární aproximací. Na druhou stranu zjistil, že nestacionární průběhy boční síly, momentu klopení a momentu stáčení, vykazují větší odchylky oproti jejich kvazi-stacionárním aproximacím. Amplitudy nestacionární boční síly a momentu klopení jsou menší oproti kvazi-stacionárním hodnotám, zatím co nestacionární moment stáčení má amplitudu dvakrát větší oproti kvazi-stacionárním hodnotám. Také sledoval, že boční síla a moment klopení vykazují časové zpoždění a zaostávají tedy za kvazi-stacionární aproximací, zatímco moment stáčení ji předchází.



Obr. 2.1 Poryv větru pro numerický výpočet a experiment [1].

Následně Theissen [1] odvodil nestacionární aerodynamický mechanismus. Zjistil, že přední část vozidla se téměř okamžitě přizpůsobí změně proudění, ale proud vstupující do úplavu v zadní části vozidla reaguje na změnu se zpožděním (Obr. 2.2). Kvůli zpožděné reakci úplavu, při dynamické změně úhlu náběhu, dochází k tomu, že boční síla na zadní části se zvětšuje, ale nemění směr. Boční síla na přední části vozidla změní směr okamžitě a působí proti zadní boční síle. To způsobí menší celkovou boční sílu, ale také zvětšení momentu stáčení. Také zjistil, že časové zpoždění úplavu je ovlivněno jeho charakteristickou topologií,

kteřá obsahuje silný proud vzduchu vstupující do úplavu ze závětrné strany, lemovaný dvěma víry nad sebou, které rotují proti sobě.



Obr. 2.2 Nestacionární aerodynamický mechanismus [1].

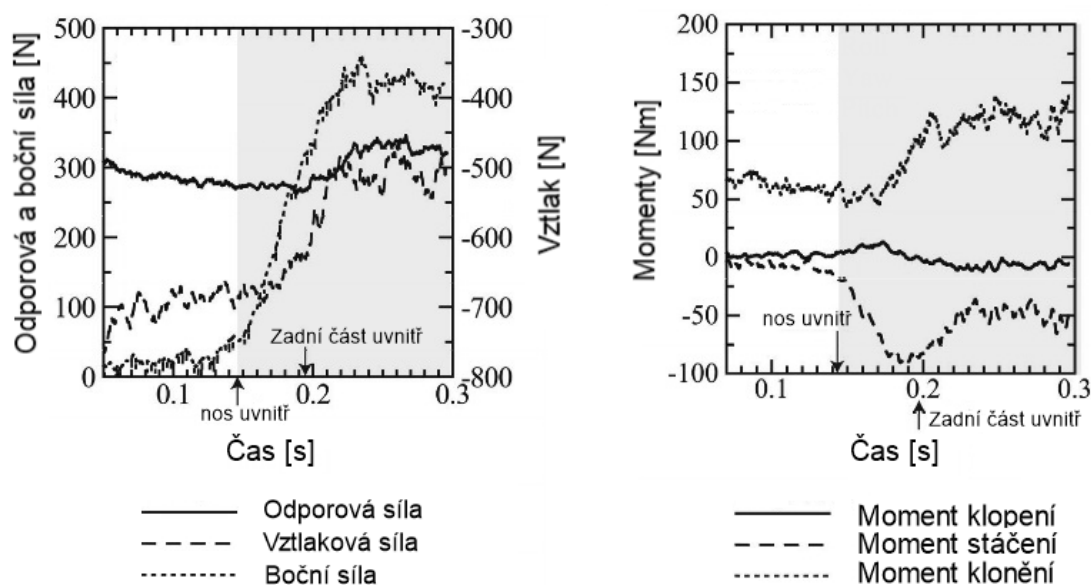
Wojciak [3] zkoumal experimentálně nestacionární aerodynamiku vozidla pod časově závislými proudovými podmínkami. Model vozidla DrivAer v měřítku 1:2 natáčel kolem jeho svislé osy $\pm 3,3^\circ$ frekvencí 2 Hz, zatímco byl vystaven proudů vzduchu s rychlostí 210 km/h v aerodynamickém tunelu. Potvrdil nestacionární chování momentu stáčení, boční síly a momentu klopení, které sledoval také Theissen [1]. Měřením povrchového tlaku Wojciak [3] zjistil, že kolem zadních světel je oblast nízkého tlaku, která vykazuje periodické oscilace během natáčení vozidla. Amplituda oscilací nestacionárního průběhu povrchového tlaku v této oblasti je zvětšená a zpožděná oproti kvazi-stacionárnímu průběhu. Oblast nízkého tlaku je výraznější na závětrné straně, kde je výraznější také zpoždění, které je způsobeno periodickým chováním proudů vstupujícího do úplavu vozidla ze závětrné strany. Časové zpoždění závětrného proudů v oblasti úplavu sledoval také Theissen [1]. Z toho vyplývá, že i když je amplituda nestacionární boční síly větší oproti kvazi-stacionárním hodnotám, kvůli zpoždění je při maximálním natočení snížena. To také vysvětluje, proč je amplituda nestacionárního momentu stáčení zvětšená oproti kvazi-stacionární aproximaci. Také zjistil, že oscilace tlaku na přední části vozidla nevykazují žádné zpoždění a okamžitě se přizpůsobí změně natočení. Wojciak [3] tedy potvrdil nestacionární mechanismus, který navrhl Theissen [1].

Tsubokura [4] zkoumal nestacionární aerodynamické chování dvou vozidel pomocí numerického přístupu, přičemž první vozidlo natáčel kolem svislé osy pomocí otáčení části sítě s vozidlem. Simulace druhého vozidla byla provedena pomocí časově závislých okrajových podmínek. Pro simulace použil metodu LES (Metoda velkých vírů). Napřed provedl simulaci s Mazdou Atenza, kterou natáčel kolem svislé osy v konstantním proudě vzduchu o rychlosti 38,9 m/s. Vozidlo bylo natočeno z nulové polohy o 5° vůči hlavnímu proudě za 0,05 s, následujících 0,05 s zůstalo natočení 5° konstantní a poté bylo za dalších 0,05 s obnoveno natočení 0° . Během tohoto natáčení sledoval, že při dynamickém natáčení vozidla jsou aerodynamické silové účinky třikrát až čtyřikrát větší než během konstantního

natočení. Také sledoval nestacionární chování vírů, tvořících se na předních sloupcích během dynamické změny natočení, které bylo výrazně odlišné od chování těchto vírů během statických podmínek. Navíc zaznamenal časové zpoždění proudu pod vozidlem vůči proudu nad vozidlem, při změně úhlu natočení.

Následně simuloval poryv bočního větru na modelu formule LOLA v měřítku 1:2 pomocí časově závislých okrajových podmínek. Vstup bočního větru na boční stěně výpočetního objemu putuje stejnou rychlostí, jako hlavní proud 45 m/s. Rychlost bočního větru roste postupně z nuly na 22,5 m/s, což odpovídá úhlu náběhu 27°, a poté zůstane konstantní. Rychlost proudu vzduchu obtékající vozidlo pak přidáním boční složky rychlosti vzroste ze 45 m/s na 50 m/s.

Jakmile přední část formule dosáhne poryv bočního větru, dojde k velkému nárůstu vztlakové síly a boční síly (Obr. 2.3 vlevo). Tsubokura [4] navíc sledoval časové zpoždění vztlakové síly oproti boční síle. Obě síly dosáhnou svého maxima až těsně poté, co vstoupí do poryvu také zadní část vozidla. Moment stáčení prudce klesne po vstupu přední části formule do poryvu a až poté, co je celé vozidlo v poryvu začne moment stáčení opět růst a ustálí se na konstantní hodnotě, jak je vidět na Obr. 2.3 vpravo. Na průběhu momentu stáčení při dynamické změně úhlu náběhu bylo sledováno nejvýraznější nestacionární chování. Moment klopení napřed lehce roste po vstupu přední části do poryvu a před vstupem celé formule do poryvu zase lehce klesá. Moment klonění prudce roste a vykazuje časové zpoždění před jeho nárůstem.



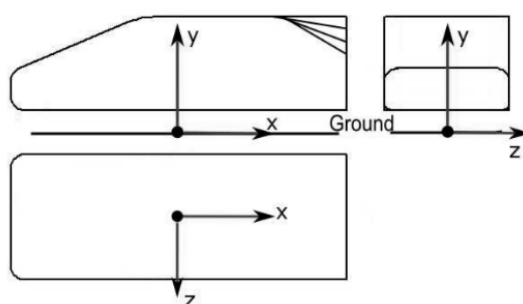
Obr. 2.3 Průběh aerodynamických silových účinků (šedá oblast značí vjezd vozidla do poryvu větru)[4].

2.2 VLIV GEOMETRIE ZADNÍ ČÁSTI VOZIDLA

Theissen [1] zkoumal nestacionární jevy na dalších variantách geometrie DrivAer. U fastbacku a kombi, stejně jako u sedanu, sledoval nestacionární jevy. Pro tyto varianty také

platí nestacionární mechanizmus, který navrhl. Topologie úplavu u fastbacku a kombi je podobná jako u sedanu. Rozdíly mezi kvazi-stacionárními a nestacionárními amplitudami boční síly, momentu klopení a stáčení jsou největší pro sedan, a nejmenší pro kombi. Nestacionární jevy jsou v základě více výrazné pro sedan a fastback než pro kombi. Kombi má sice nejmenší rozdíly mezi kvazi-stacionárními a nestacionárními amplitudami jednotlivých silových účinků, ale vyznačuje se většími amplitudami boční síly a momentu klopení, než mají ostatní varianty. Nejmenší amplitudy boční síly a momentu klopení má fastback. Moment stáčení je největší pro fastback, nejmenší pro kombi. Největší časové zpoždění nestacionárních amplitud oproti kvazi-stacionárním zaznamenal u momentu klopení pro všechny varianty. Také zjistil, že nestacionární jevy jsou ovlivněny silou proudu vstupujícího do úplavu ze závětrné strany, časovým zpožděním úplavu a velikostí boční nárazové plochy.

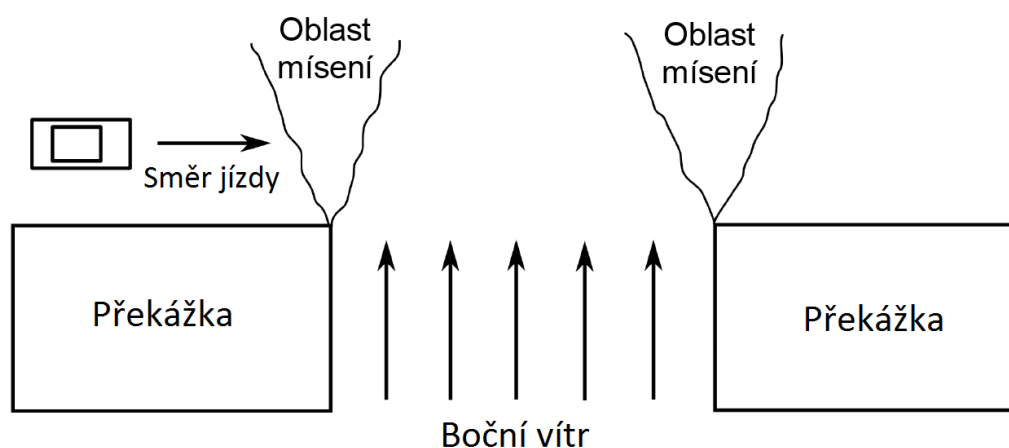
Pomocí experimentálního přístupu zkoumal také Wojciak [3] vliv zadní části geometrie DrivAer na nestacionární chování vozidla. Zjistil, že nestacionární jevy se objevují kromě sedanu i u fastbacku a kombi. Nestacionární jevy jsou více výrazné pro sedan a méně pro kombi. Rozdíly mezi nestacionárními a kvazi-stacionárními amplitudami boční síly a momentu stáčení jsou největší pro sedan a nejmenší pro kombi. Rozdíly momentu klopení jsou velmi podobné, lehce větší však pro fastback a kombi. Největší amplitudu jak nestacionární, tak kvazi-stacionární boční síly zaznamenal u kombi. Vozidlo s největší amplitudou boční síly má nejmenší amplitudu momentu stáčení a naopak. To platí jak pro kvazi-stacionární, tak i pro nestacionární amplitudy. Amplitudy momentu klopení jsou u všech variant velmi podobné. Pro fastback však zaznamenal lehce menší amplitudy kvazi-stacionárního i nestacionárního momentu klopení. Nejvyšší hodnoty časového zpoždění nestacionárních amplitud oproti kvazi-stacionárním sledoval pro moment klopení, a to u všech variant. Zpoždění boční síly a momentu klopení zaznamenal u kombi menší než u ostatních variant.



Obr. 2.4 Geometrie Windsor [2].

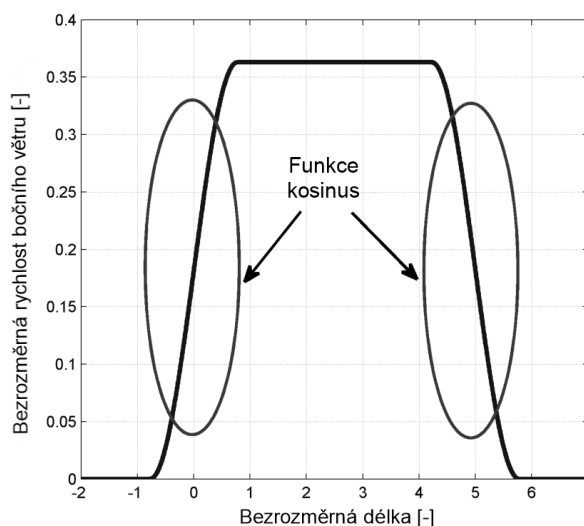
Favre [2] prováděl simulace poryvu bočního větru pomocí CFD na jednoduché geometrii vozidla Windsor. Zkoumal vliv tvaru zadní části vozidla na nestacionární chování. Zadní část modelu Windsor byla skloněna o 0° , 10° , 25° a 35° (Obr. 2.4). Názvy jednotlivých variant jsou odvozeny od těchto úhlů. W_35, W_25, W_10 a W_0, přičemž W_0 se dá přirovnat ke kombi a ostatní k různým variantám typu fastback. Vozidlo bylo hnáno konstantní rychlostí 27 m/s skrze kolmý proud vzduchu s rychlostí 9,8 m/s, což odpovídá náhlému vystavení silnému poryvu bočního větru. Maximální rychlost bočního větru byla nastavena tak, aby výslednice rychlosti svírala s osou x 20° . Jednovrcholový poryv větru modeloval jako skokovou funkci s jemnými přechody, které představují oblasti mísení po stranách proudu bočního větru (Obr. 2.5). Tyto jemné přechody jsou vytvořeny pomocí funkce kosinus, jak je

patrné z Obr. 2.6. Pro všechny simulace použil komerční řešič STAR-CD v4 a DDES turbulentní model.



Obr. 2.5 Situace poryvu bočního větru [2].

Favre [2] zkoumáním nestacionárních průběhů aerodynamických silových účinků zjistil, že při vstupu vozidla do poryvu větru dojde u všech variant ke snížení odporové síly. Když je vozidlo celé uvnitř poryvu, roste odporová síla a svého maxima dosáhne, když je přední část z poryvu venku, zatímco zadní část je ještě poryvem ovlivňována. W_{10} má největší amplitudu odporové síly během poryvu a zároveň nejmenší amplitudu odporové síly v podmínkách mimo poryv. Největší nárůst vztlakové síly byl zaznamenán pro W_{10} a W_{25} , naopak W_0 vytváří přítlačnou sílu, která stabilizuje vozidlo při klonění. Zjistil, že vozidlo s největší boční silou (W_0) má nejmenší moment stáčení a naopak (W_{25}). Moment klonění je ovlivňován odporovou silou a vztlakovou silou, moment klopení je významně ovlivňován boční silou.



Obr. 2.6 Model poryvu větru [2].

2.2.1 SHRnutí

Nestacionární jevy se objevují u všech variant karoserie a jsou výraznější pro sedan a méně výrazné pro kombi.

Vozidlo s největšími amplitudami momentu stáčení má nejmenší amplitudy boční síly a naopak.

Kombi má nejmenší rozdíly mezi kvazi-stacionárními a nestacionárními amplitudami boční síly a momentu stáčení (méně výrazné nestacionární chování), zároveň se ale oproti ostatním variantám vyznačuje největšími amplitudami boční síly a nejmenšími amplitudami momentu stáčení.

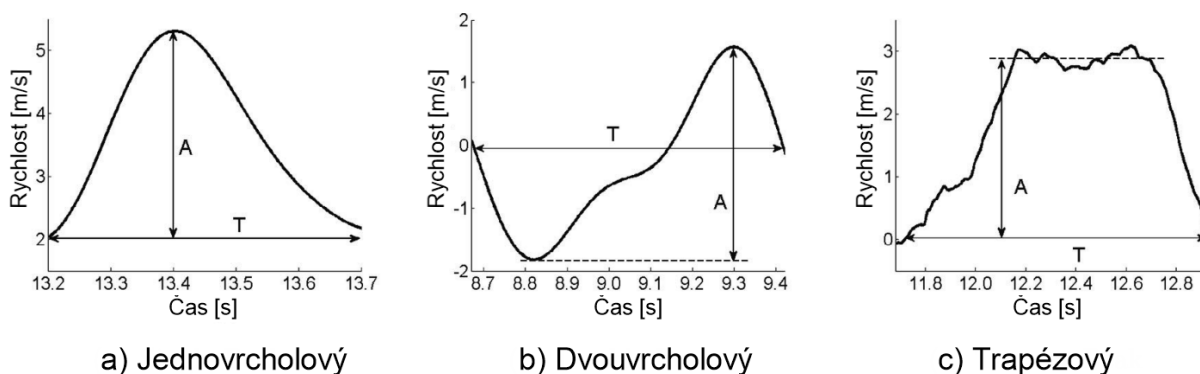
Rozdíly mezi nestacionárními a kvazi-stacionárními amplitudami boční síly a momentu stáčení jsou největší pro sedan.

Zpoždění nestacionárních amplitud boční síly a momentu klopení oproti kvazi-stacionárním amplitudám je nejmenší pro kombi.

Moment klopení obecně vykazuje největší časové zpoždění.

2.3 NASTAVENÍ PORYVU BOČNÍHO VĚTRU

Wojciak [3] modeloval poryv větru natáčením vozidla kolem jeho svislé osy v aerodynamickém tunelu pro experiment a pomocí natáčení části sítě obsahující vozidlo vůči zbytku výpočetního objemu pro numerické ověření, kvůli jejich následnému srovnání. Při natáčení vozidla uhýbá přední část proudu vzduchu, zatímco zadní část jde proudem naproti. Každá část je tedy během dynamické změny natočení vystavena jiné rychlosti proudění. Podle Tsubokury [4] dochází k zesílení nestacionárních jevů. Navíc přidáním boční složky rychlosti, je výsledná celková rychlost proudu vzduchu obtékající vozidlo ještě vyšší, čehož nelze dosáhnout natáčením vozidla v proudu vzduchu s konstantní rychlostí. Tyto rozdíly jsou sice malé, ale použití časově závislých okrajových podmínek je reálnější a více se podobá skutečné jízdě v podmínkách s bočním větrem. Tsubokura [4] poznamenal, že model s natáčením vozidla reprezentuje spíše zásah řidiče do řízení, ale poryv bočního větru je výhodnější modelovat pomocí časově závislých okrajových podmínek.



Obr. 2.7 Kategorie profilů poryvu [3].

Wojciak [3] zkoumal experimentálně proudové podmínky během poryvu větru pomocí silničního testu na německé dálnici a naměřil 163 poryvů větru při konstantní rychlosti

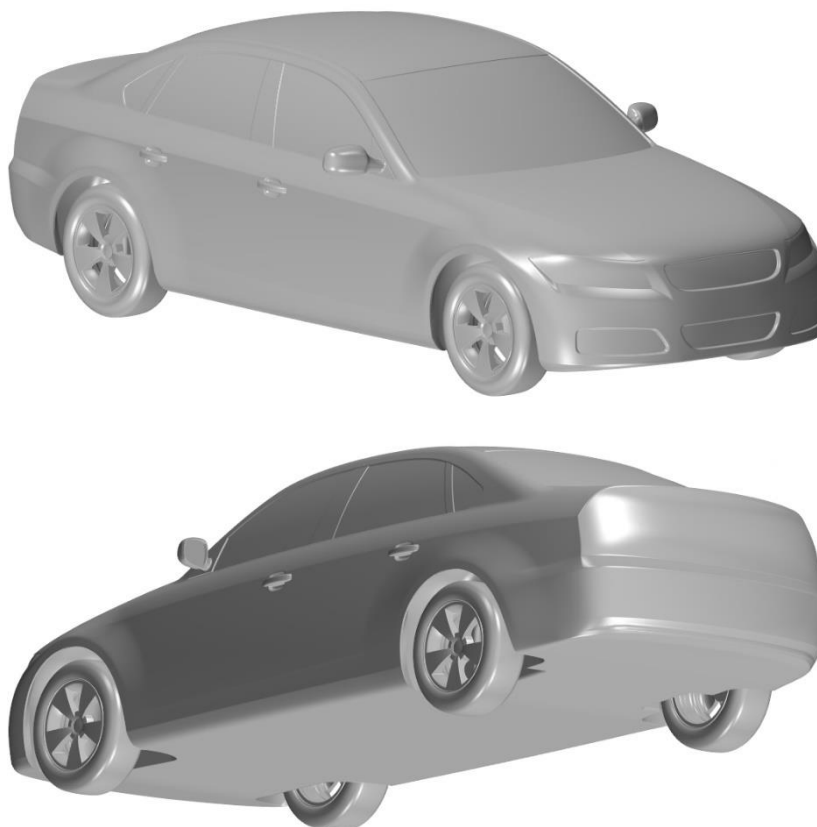
38,9 m/s. Na Obr. 2.7 jsou znázorněny kategorie profilů poryvu větru, které naměřil. Zjistil, že nejčastěji se objevuje jednovrcholový poryv větru (63%), který může být popsán funkcí sinus. Tuto variantu použil Theissen [1]. O něco méně (28%) se také objevuje trapézový poryv větru, který použil například Favre [2], Tsubokura [4] a Forbes [7]. Nejméně (9%) se vyskytuje dvouvrcholový poryv větru. Amplitudy rychlosti poryvů byly naměřeny v rozsahu mezi 1 m/s a 8 m/s, přičemž nejčastější byly poryvy s amplitudou mezi 3 m/s a 5 m/s. Pro rychlost 140 km/h to vede na změnu úhlu natočení s amplitudou v rozsahu od 1° do 13°, nejčastěji se vyskytují amplitudy natočení mezi 5° a 9°. Také by měl být zvážěn rozsah frekvencí poryvu větru mezi 0,5 Hz a 4 Hz. Na základě těchto výsledků Wojciak [3] poznamenal, že vysoké úhly natočení okolo 30°, které použil například Favre [2], Tsubokura [4] a Forbes [7] jsou nerealistické.

3 METODOLOGIE

V této kapitole je popis numerického výpočtu proudění kolem vozidla, které je vystaveno poryvu bočního větru. Je zde popis poryvu větru, použité geometrie, výpočetního objemu a sítě, dále jsou zde některá důležitá nastavení numerického výpočtu a na závěr srovnání kontinuálního a trapézového poryvu. Použité metody byly zvoleny tak, aby co možná nejvíce přiblížili reálnou situaci, ve které se vozidlo nachází, s ohledem na výpočtovou náročnost, kterou jsou výpočty značně omezeny.

3.1 GEOMETRIE

V této práci byla použita realistická geometrie DriAver (Obr. 3.1), vytvořená na Technické univerzitě v Mnichově. Jedná se o geometrii vozidla střední třídy, která obsahuje tři varianty karoserie. Sedan, fastback a kombi. V této práci budou prováděny výpočty pouze na variantě sedan a kombi. Přední část vozidla a podvozek je pro obě varianty stejný. Mění se jen vrchní zadní část, jak je vidět na Obr. 3.2. Boční průřez vozidla, ve směru osy y, je velmi důležitým parametrem při zkoumání jeho stability při bočním větru. Sedan má větší boční průřez než verze kombi. Ostatní rozměry včetně rozvoru zůstávají stejné (Tab. 1).



Obr. 3.1 Geometrie DriAver.

Z důvodu snížení výpočtové náročnosti byla složitá podlaha nahrazena rovnou podlahou a nebyly zahrnuty kotouče brzd, zavěšení a výfukové potrubí. Do výpočtu také nebylo zahrnuto proudění pod kapotou v prostoru motoru. Rotace kol byla provedena pouze jednoduchým předpisem obvodové rychlosti na povrchu kvůli výpočtové náročnosti a také kvůli tomu, že vliv rotace nebyl cílem práce.

Tab. 1 Rozměry a průřezy geometrie DrivAer [1].

Typ karoserie	Délka [m]	Rozvor [m]	Čelní průřez (ve směru osy x) [m]	Boční průřez (ve směru osy y) [m]
DrivAer sedan	4.61	2.79	2.17	4.56
DrivAer kombi	4.61	2.79	2.17	4.69



a) DrivAer sedan



b) DrivAer kombi

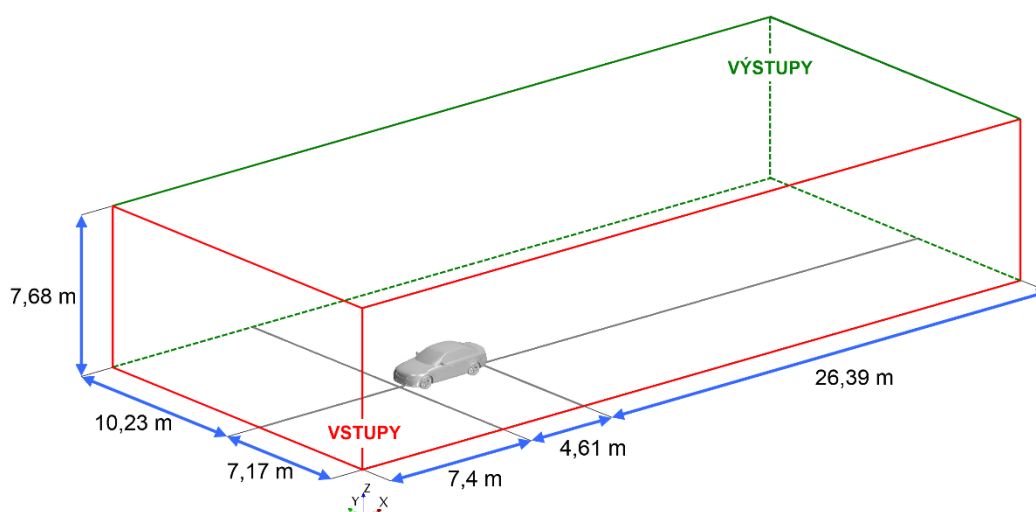
Obr. 3.2 Varianty karoserie DrivAer.

3.2 VÝPOČETNÍ OBJEM

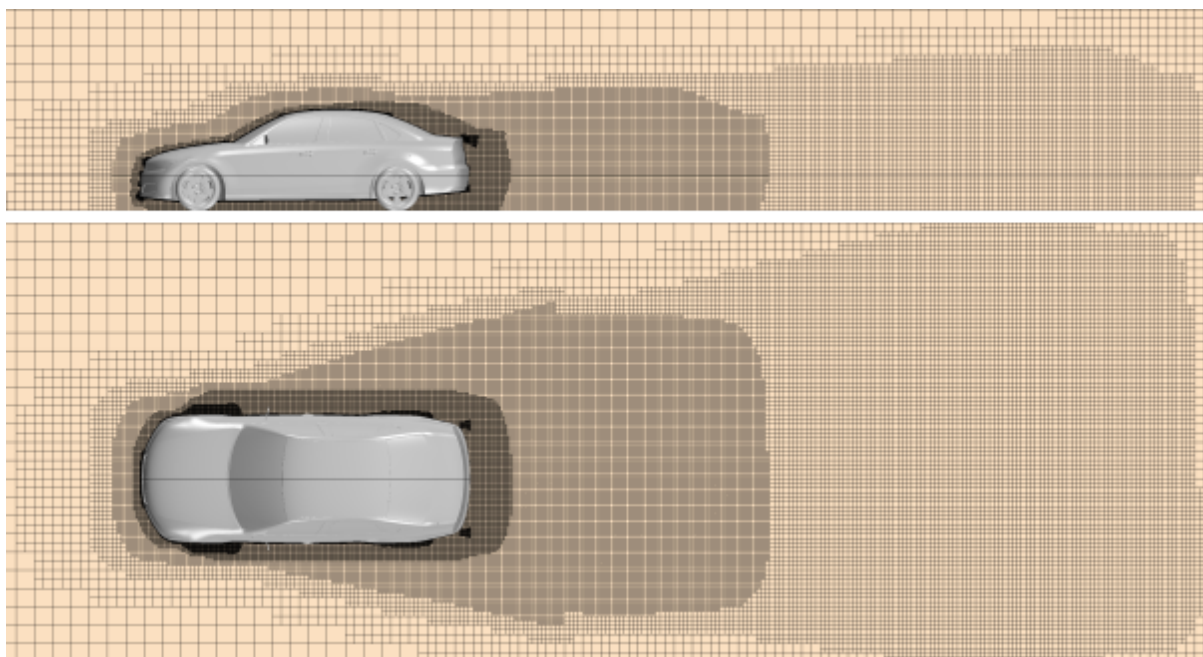
Na Obr. 3.4 je znázorněno umístění vozidla ve výpočetním objemu. Výpočetní objem byl rozšířen 7,4 m před vozidlem, 26,39 m za vozidlem a 6,27 m nad vozidlem. Celý objem má tedy délku 38,4 m, šířku 17,4 m a výšku 7,68 m. Vozidlo je v tomto objemu posunuto o 1,53 m v záporném směru osy y kvůli tomu, že úplav vozidla se vychyluje pouze v kladném směru osy y.

3.3 Síť

Síť má v tomto objemu 15 milionů buněk a je dominantně hexahedrální. Zjemnění sítě bylo provedeno v místech, kde bylo vyžadováno přesnější výsledky, například v blízkosti kol, v oblasti úplavu a na hranách vozidla (odtrhové hrany kufru, sloupky). Nejmenší buňky mají velikost 1 mm. Největší buňky mají velikost 512 mm a nachází se v místech, kde nepotřebujeme příliš přesné výsledky. Například v rozích a u stropu výpočetního objemu. Zjemněné oblasti za vozidlem jsou lehce natočeny tak, aby zahrnovaly úplav vozidla jak při úhlu náběhu 0°, tak při úhlu náběhu 9°. Výška první prismatické vrstvy blízko stěny byla nastavena převážně na 1 mm.



Obr. 3.4 Umístění vozidla ve výpočetním objemu.

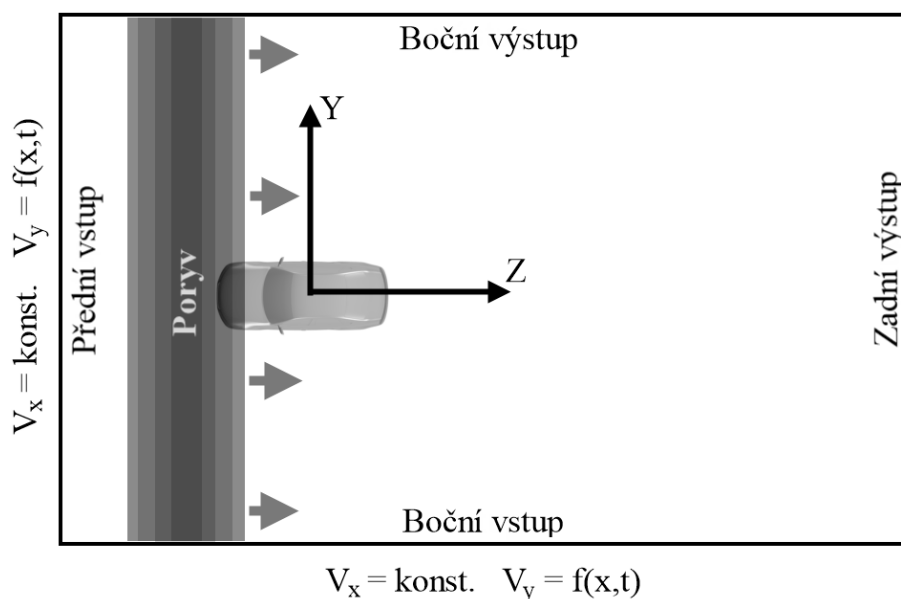


Obr. 3.3 Zjemnění sítě kolem vozidla a v oblasti úplavu.

3.4 NUMERICKÉ NASTAVENÍ

Proudění vzduchu kolem vozidla bylo počítáno pomocí metody CFD (Computational Fluid Dynamics), kvůli schopnosti analyzovat a získávat množství detailních dat o proudovém poli. Všechny výpočty včetně vytváření sítě byly provedeny v programu STAR-CCM+ 11.06.010. Pro CFD simulaci byl použit K-Epsilon turbulentní model, založený na metodě RANS.

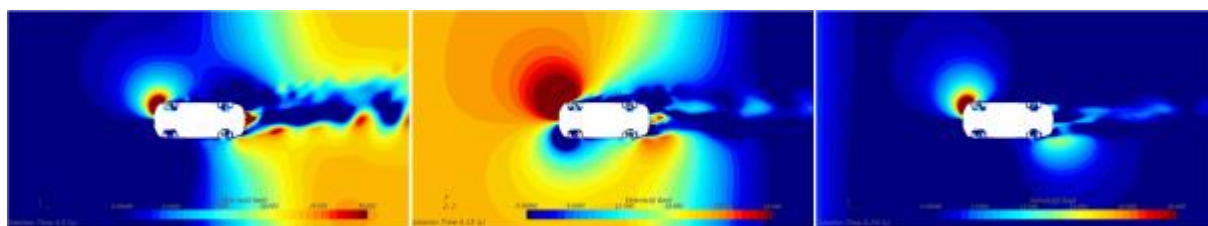
Výpočetní objem obsahuje přední a boční vstup a zadní a boční výstup, jak je vidět na Obr. 3.5. Na obou vstupech byla aplikována stejná funkce popisující průběh boční složky rychlosti V_y , zatímco podélná rychlost hlavního proudu V_x , která nahrazuje rychlost vozidla, byla na obou vstupech konstantní. Podlaha a strop byly nastaveny jako nepohyblivé stěny.



Obr. 3.5 Numerické nastavení poryvu větru.

3.5 PORYV BOČNÍHO VĚTRU

V této práci byl model poryvu větru inspirován zkoumáním Favreho [2], Theissena [1] a Wojciaka [3] a modelován pomocí časově závislých okrajových podmínek, které jsou znázorněny na Obr. 3.5. Pro výpočet byl použit kontinuální sinusový poryv (Obr. 3.7a) a trapézový poryv (Obr. 3.7b). Oba poryvy mají stejnou frekvenci a amplitudu kvůli následnému srovnání. Frekvence, rychlost vozidla, amplituda boční složky rychlosti a tvar profilu poryvu byly voleny na základě zkoumání Wojciaka [3], viz kapitola 2.3. Přidáním boční složky rychlosti u obou poryvů byla výsledná rychlost proudění kolem vozidla V zvětšena ze 140 km/h na 141,745 km/h.



Obr. 3.6 Průchod poryvu větru výpočetním objemem

Kontinuální poryv větru byl v této práci modelován pomocí funkce sinus s frekvencí 2 Hz. Rychlost vozidla je reprezentována konstantní rychlostí proudu vzduchu $V_x = 140$ km/h ve směru jízdy. Rychlost bočního větru V_y je funkcí času a prostoru:

$$V_{y(x,t)} = \frac{1}{2} \cdot V_{y_{max}} \cdot \sin\left(\omega \cdot \left[\frac{x}{V_x} - t\right] - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{2} \cdot V_{y_{max}}, \quad (4)$$

kde $V_{y_{max}}$ je amplituda boční rychlosti, ω je frekvence, x je poloha ve směru osy x a t je čas. Amplituda rychlosti V_y je volena tak, aby spolu s rychlostí V_x tvořila výslednici, která svírá

s osou x úhel 9° . To odpovídá rychlosti $V_{y_{max}} = 22,174$ km/h. Vstup boční složky rychlosti tedy putuje po stěně bočního vstupu rychlostí hlavního proudu a výsledkem je poryv větru, který prochází přes vozidlo a celým výpočtním objemem (Obr. 3.6).

Trapézový poryv bočního větru byl modelován podle Favreho [2] jako skoková funkce s jemnými přechody. Tyto přechody jsou modelovány funkcí cosinus s frekvencí 2 Hz a amplitudou $V_{y_{max}} = 22,174$ km/h. Po přechodové části následuje setrvání 0,25 s na maximální hodnotě boční rychlosti a poté opět pokles na nulu. To odpovídá změně úhlu náběhu z konstantní hodnoty 0° na 9° a zpět na 0° . Za počátek poryvu je považován čas v polovině nárůstu amplitudy. Na Obr. 3.5b je začátek poryvu v čase 0,5 s. Délka poryvu od tohoto času je 0,5 s, což odpovídá zhruba čtyřem délkám vozidla při rychlosti hlavního proudu 140 km/h. Rychlost bočního větru V_y je opět funkcí času a prostoru v intervalech:

$$pro: x < V_x \cdot \left[t - \left(t_0 - \frac{t_{nárůst}}{2} \right) \right]$$

$$V_{y(x,t)} = 0$$

$$pro: V_x \cdot \left[t - \left(t_0 - \frac{t_{nárůst}}{2} \right) \right] < x < V_x \cdot \left[t - \left(t_0 + \frac{t_{nárůst}}{2} \right) \right]$$

$$V_{y(x,t)} = \frac{1}{2} \cdot V_{y_{max}} \cdot \cos \left[\omega \cdot \left(\frac{x}{V_x} - \left[t - \left(t_0 - \frac{t_{nárůst}}{2} \right) \right] \right) \right] + \frac{1}{2} \cdot V_{y_{max}}$$

$$pro: V_x \cdot \left[t - \left(t_0 + \frac{t_{nárůst}}{2} \right) \right] < x < V_x \cdot \left[t - \left(t_0 + t_{poryv} - \frac{t_{nárůst}}{2} \right) \right]$$

$$V_{y(x,t)} = V_{y_{max}}$$

$$pro: V_x \cdot \left[t - \left(t_0 + t_{poryv} - \frac{t_{nárůst}}{2} \right) \right] < x < V_x \cdot \left[t - \left(t_0 + t_{poryv} + \frac{t_{nárůst}}{2} \right) \right]$$

$$V_{y(x,t)} = \frac{1}{2} \cdot V_{y_{max}} \cdot \cos \left[\omega \cdot \left(\frac{x}{V_x} - \left[t - \left(t_0 + t_{poryv} + \frac{t_{nárůst}}{2} \right) \right] \right) \right] + \frac{1}{2} \cdot V_{y_{max}}$$

$$pro: x > V_x \cdot \left[t - \left(t_0 + t_{poryv} + \frac{t_{nárůst}}{2} \right) \right]$$

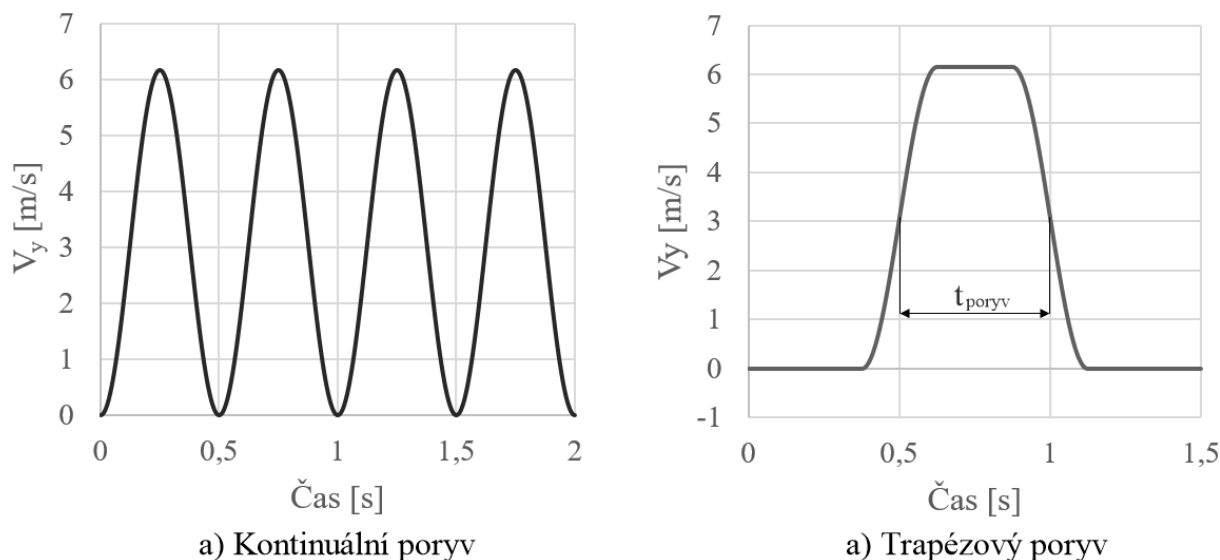
$$V_{y(x,t)} = 0, \tag{5}$$

kde $t_{nárůst}$ je čas nárůstu amplitudy poryvu, t_{poryv} je délka poryvu v čase a t_0 je počáteční čas poryvu pro který:

$$V_{y(x,t)} = \frac{1}{2} V_{y_{max}}, \tag{6}$$

a kde pro frekvenci ω platí:

$$\omega = \frac{\pi}{t_{nárůst}}. \tag{7}$$



Obr. 3.7 Funkce boční složky rychlosti pro a) kontinuální a b) trapézový poryv v polovině rozvoru.

3.5.1 NASTAVENÍ PRO NESTACIONÁRNÍ VÝPOČET

U sedanu byl pro výpočet použit trapézový poryv se třemi vrcholy vzdálenými 1 s od sebe, což je dostatečný čas pro ustálení proudění kolem vozidla. Pro analýzu průběhů aerodynamických silových účinků u sedanu byl vybrán třetí vrchol trapézového poryvu, u kterého bylo proudění nejvíce rozvinuté. To je důvod, proč není před začátkem poryvu rovný ustálený průběh, ale ustálení z předchozího poryvu. U výpočtu kombi byly počítány dva vrcholy trapézového poryvu a pro analýzu byl vybrán druhý. Pro nestacionární výpočty byl zvolen časový krok 0,002 s.

3.5.2 KVAZI-STACIONÁRNÍ SILOVÉ ÚČINKY

Pro srovnání nestacionárních průběhů se stacionárními hodnotami byly provedeny simulace při konstantním úhlu náběhu. Toho bylo dosaženo nastavením konstantní rychlosti V_x a V_y pro přední i boční vstup, jejichž výslednice svírá s osou x požadovaný úhel náběhu. Stacionární výpočet byl proveden pro úhel náběhu 9° a 0° .

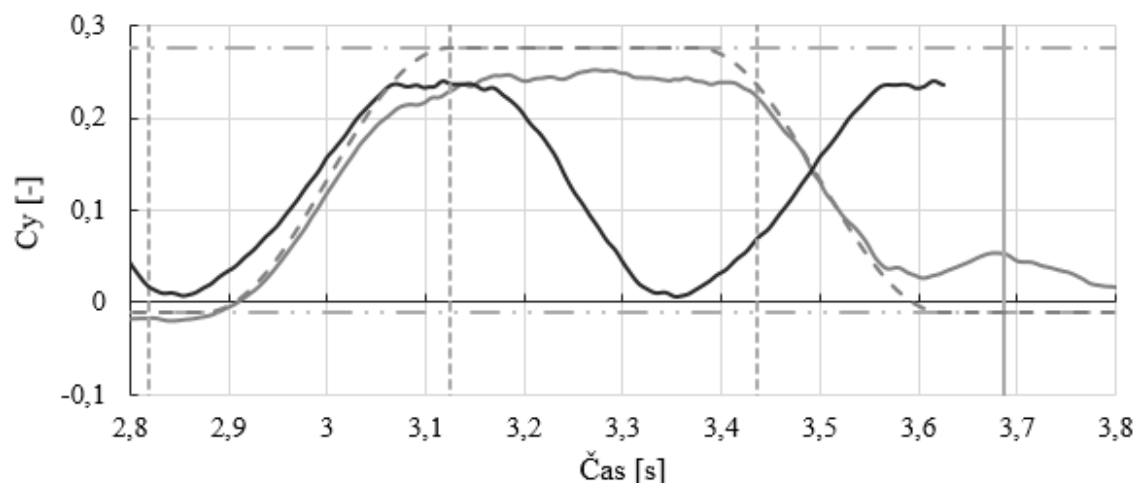
Kvazi-stacionární průběh aerodynamických silových účinků byl vytvořen podle Theissena [1] proložením těchto dvou stacionárních stavů funkcí sinus, která popisuje průběh boční složky rychlosti V_y v referenčním bodě v polovině rozvoru. Tato aproximace byla vytvořena pouze pro boční sílu, moment stáčení a moment klopení. U ostatních silových účinků byly vytvořeny pouze vodorovné přímky pro maximální a minimální stacionární hodnoty při konstantních úhlech náběhu 9° a 0° .

Stacionární výpočet byl u sedanu pro konstantní úhel náběhu 9° počítán stacionárním výpočtem, ale většina úloh je přirozeně nestacionární. Ostatní stacionární výpočty tedy byly počítány nestacionárně (pro sedan konstantní úhel náběhu 0° , pro kombi konstantní úhel náběhu 9° a 0°). Pro získání stacionárních dat byl nestacionární výpočet počítán

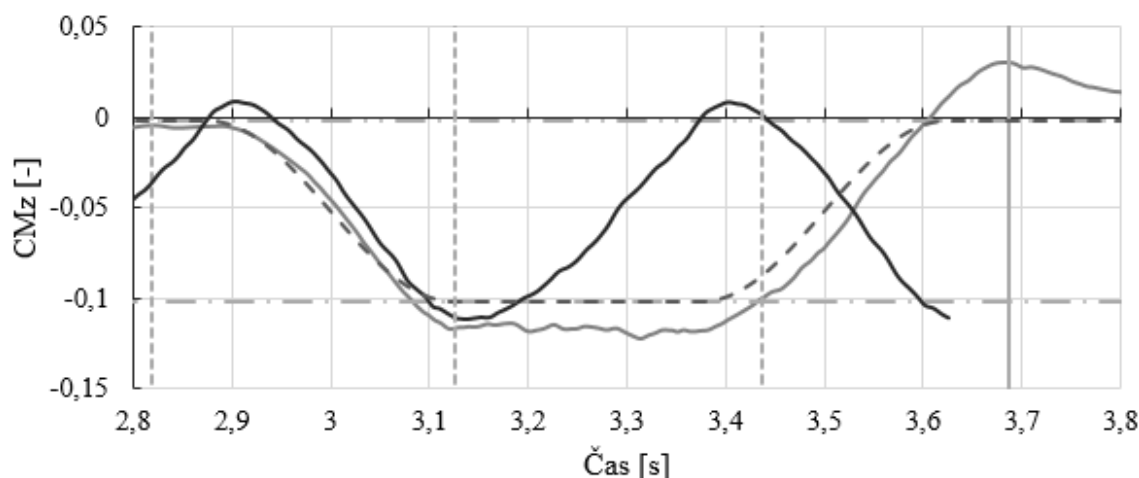
1 s a zprůměrován na intervalu dlouhém 0,5 s. Pro tento nestacionární výpočet u kombi byl zvolen krok 0,002 s a u sedanu 0,0025 s.

3.6 SROVNÁNÍ KONTINUÁLNÍHO A TRAPÉZOVÉHO PORYVU

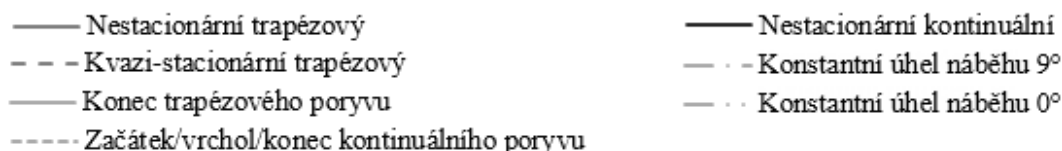
V této části je srovnání dvou poryvů, které byly použity pro nestacionární výpočet a následné zhodnocení, který poryv se více hodí pro další hodnocení citlivosti vozidla na boční vítr.



a) Boční síla



a) Moment stáčení

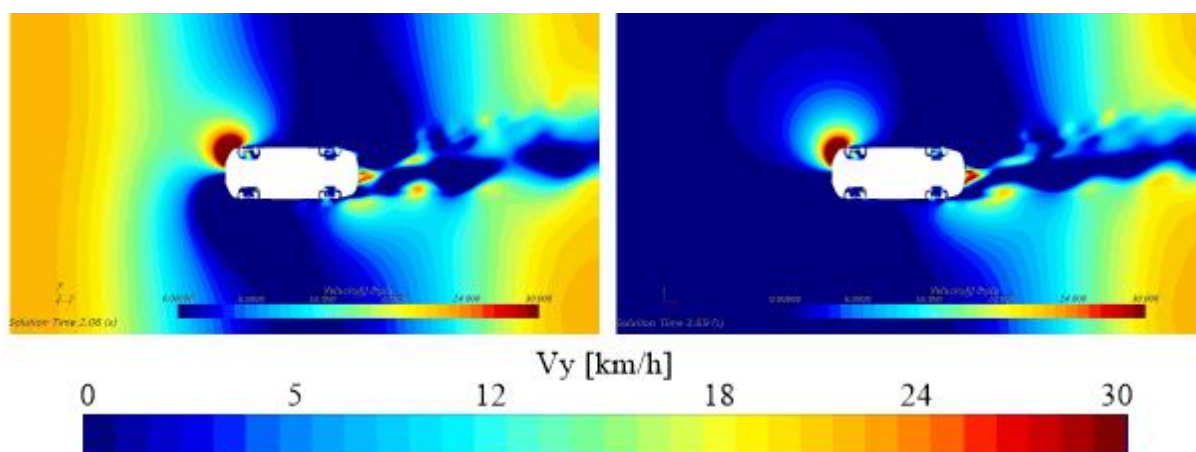


Obr. 3.8 Srovnání kontinuálního a trapézového poryvu pro a) boční sílu b) moment stáčení.

Na Obr. 3.8 je srovnání trapézového a kontinuálního poryvu pro boční sílu a moment stáčení. Nejvýraznější nestacionární chování bylo zaznamenáno pro boční sílu, moment stáčení a klopení, ale srovnání bylo provedeno pouze pro boční sílu a moment stáčení, protože moment klopení vykazuje podobné chování jako boční síla. Pro srovnání byly synchronizovány

počátky poryvů tak, aby začátek nárůstu boční složky rychlosti v polovině rozvoru vozidla byl pro oba poryvy v čase 2,875 s.

Spolu s nestacionárními průběhy obou poryvů je zde také vykreslen kvazi-stacionární průběh trapézového poryvu, který má po vrchol poryvu totožný náběh amplitudy, jako kvazi-stacionární průběh kontinuálního poryvu. Dále je zde pro kontinuální poryv svisle vyznačen začátek růstu poryvu na předním konci vozidla, vrchol poryvu v polovině rozvoru a konec poryvu na zadním konci vozidla, který je zde také pro trapézový průběh. Pro srovnání jsou zde vodorovné přímky, které znázorňují úroveň stacionárních hodnot jednotlivých aerodynamických silových účinků pro úhel náběhu 9° a 0° .



Obr. 3.9 Srovnání proudového pole pro kontinuální poryv (vlevo) a trapézový poryv (vpravo) při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu.

U obou poryvů pro boční sílu i moment stáčení bylo sledováno nestacionární chování jak na vrcholu poryvu při úhlu náběhu 9° , tak i na konci poryvu při úhlu náběhu 0° . Boční síla trapézového poryvu dosáhne 105 % vrcholu kontinuálního poryvu a moment stáčení 109 % vrcholu trapézového poryvu, ale přeběhnutí momentu stáčení na konci poryvu pro trapézový poryv dosahuje 345 % hodnoty přeběhnutí u kontinuálního poryvu. Navíc u kontinuálního poryvu na rozdíl od trapézového poryvu nedochází k opětovnému nárůstu boční síly při výjezdu zadní části z poryvu. Je to z toho důvodu, že začátek růstu dalšího poryvu je 0,12 s před koncem předchozího poryvu. Je zde tedy nedostatek času pro rozvinutí proudění kolem vozidla a nestacionární jevy se nestihnou tolik projevit.

Na Obr. 3.9 je srovnání proudového pole při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu pro kontinuální a trapézový poryv. Je to v místě, kde dochází k největším rozdílům koeficientů nestacionárních momentů stáčení. Pro kontinuální poryv v čase 3,44 s a pro trapézový poryv v čase 3,69 s. Pro obě varianty je vykreslena složka boční rychlosti V_y v rovině rovnoběžné s rovinou xy ve výšce 300 mm. U kontinuálního poryvu dochází při výjezdu zadního konce vozidla k ovlivňování přední části následujícím poryvem, který začíná urychlovat proud kolem pravého předního rohu, zatímco zadní část je stále ovlivňována předchozím poryvem. Z toho důvodu u kontinuálního poryvu nedojde k tak výraznému přeběhnutí kvazi-stacionárních hodnot u momentu stáčení a opětovnému nárůstu u boční síly.

Při hodnocení citlivosti vozidla na boční vítr za použití kontinuálního poryvu může docházet k výraznému podhodnocení silových účinků, zejména momentu stáčení při výjezdu vozidla

z poryvu. Kontinuální poryv vytvořený pomocí funkce sinus se používá v návaznosti na experimenty prováděné v aerodynamickém tunelu [1], [3]. Pokud by bylo vozidlo v reálné situaci vystaveno jedinému poryvu jako například na Obr. 2.5, je výhodnější použít pro simulaci trapézový poryv spíše, než poryv podobající se situaci v aerodynamickém tunelu.

Pro další výpočty byl použit trapézový poryv s frekvencí 2 Hz, s amplitudou $V_{y_{max}} = 22,174$ km/h a s výdrží 0,25 s na úhlu náběhu 9° .

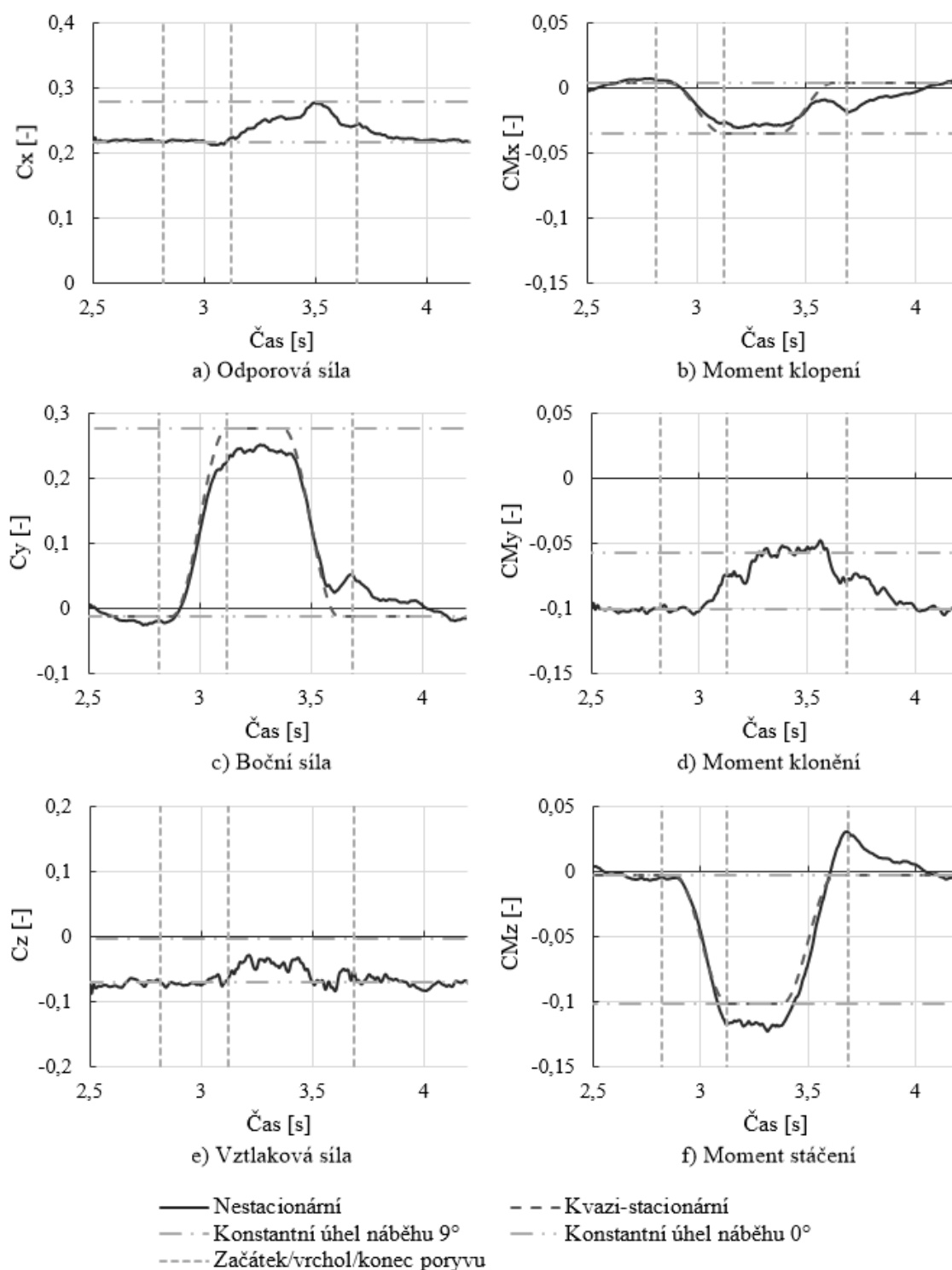
4 NESTACIONÁRNÍ JEVY BĚHEM PORYVU BOČNÍHO VĚTRU

Tato práce se zabývá čistě aerodynamikou vozidla. Zkoumání aerodynamického chování vozidla projíždějícího poryvem bočního větru, zejména při výjezdu z něj, je důležité v návaznosti na dynamiku vozidla a reakci řidiče. V první fázi je ale nutné pochopení nestacionárních jevů, které se při poryvech bočního větru vyskytují. Také je důležité použít dynamický přístup, protože silové účinky získané statickým způsobem mohou být výrazně podhodnocené. Pro pochopení nestacionárního chování reálné geometrie vozidla při poryvu bočního větru byly v první části pomocí CFD analyzovány průběhy nestacionárních aerodynamických silových účinků jak v čase, tak pro některé důležité časy také po délce vozidla a srovnány s kvazi-stacionárními aproximacemi. V druhé části bylo zkoumáno rozložení tlaku na povrchu vozidla, ve třetí části proudové pole kolem vozidla. V předposlední části byl popsán nestacionární mechanismus a v poslední části bylo zkoumáno nestacionární chování odporové síly.

4.1 PRŮBĚHY AERODYNAMICKÝCH SILOVÝCH ÚČINKŮ

Na Obr. 4.1 jsou průběhy koeficientů aerodynamických silových účinků, které působí na vozidlo během poryvu větru. Odporová síla C_x , boční síla C_y , vztlačová síla C_z , moment klopení C_{M_x} , moment klonění C_{M_y} a moment stáčení C_{M_z} . Vodorovnými přímkami jsou pro srovnání znázorněny konstantní úrovně kvazi-stacionárních hodnot získaných pro konstantní úhel náběhu 9° a 0° . Dále je zde svislými přímkami znázorněn začátek růstu poryvu na předním konci vozidla, vrchol poryvu v polovině rozvoru a konec poryvu na zadním konci vozidla. Pro C_y , C_{M_x} a C_{M_z} jsou vykresleny také kvazi-stacionární průběhy odvozené ze stacionárních hodnot. Kvůli snadnějšímu srovnání je zachováno stejné měřítko svislé osy zvlášť pro síly a momenty.

Koeficient odporové síly C_x po vjezdu předního konce vozidla do poryvu zůstává stále na stejné úrovni. Když se přední část vozidla začne blížit vrcholu poryvu, C_x lehce poklesne a od této chvíle roste. V čase 3,49 s, přibližně v polovině amplitudy V_y , mezi časem výjezdu zadního konce vozidla z vrcholu poryvu a časem výjezdu předního konce vozidla z poryvu, dosáhne C_x svého maxima, což je 99 % kvazi-stacionárních hodnot, ovšem se zpožděním 0,369 s oproti vrcholu poryvu v čase 3,125 s. Následuje pokles C_x a lehký nárůst zaznamenaný ještě při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu v čase 3,69 s. Vzhledem k výraznému časovému zpoždění nestacionární amplitudy za kvazi-stacionární amplitudou, bylo nestacionární chování C_x podrobněji zkoumáno v kapitole 4.5. Koeficient vztlačové síly C_z vykazuje podobné chování na začátku poryvu a začne růst až po dosažení vrcholu a do svého maxima naroste jen přibližně o 58 % kvazi-stacionární hodnoty. Zpožděný nárůst odporové a vztlačové síly sledoval také Tsubokura [4]. Nárůst zaznamenal také C_{M_y} , který na svém vrcholu narostl přibližně o 120 % kvazi-stacionární hodnoty. Navíc zaznamenává zpožděný návrat na výchozí úroveň úhlu náběhu 0° . Nárůst momentu klonění odpovídá naklánění vozidla dozadu. Výchyly koeficientů C_x a C_{M_y} jsou malé a mohou být považovány za nekritické. Koeficient vztlaku C_z sice zaznamenal větší rozdíl mezi nestacionárními a kvazi-stacionárními hodnotami, ale v tomto případě je kvazi-stacionární průběh spíše konzervativní aproximací a může být také považován za nekritický. Za nekritické považoval tyto koeficienty také Theissen [1]. Výraznější výchyly byly zaznamenány pro koeficienty C_y , C_{M_x} a C_{M_z} , které mohou výrazněji ovlivnit dynamiku vozidla při průjezdu poryvem bočního větru. Podle Theissena [1] jsou boční síla, moment klopení a moment stáčení relevantní pro dynamiku vozidla během poryvu bočního větru. Pro hodnocení citlivosti vozidla na boční vítr je podle Favreho [2] nejdůležitějším parametrem moment stáčení.



Obr. 4.1 Průběhy koeficientů aerodynamických silových účinků.

Koeficient boční síly C_y zaznamenal po vjezdu do poryvu nárůst s lehkým zpožděním oproti kvazi-stacionárnímu průběhu a svého maxima dosáhne až když celé vozidlo dosáhne vrcholu poryvu v čase 3,27 s. Amplituda C_y dosáhne 91 % kvazi-stacionární hodnoty a oproti vrcholu poryvu je zpožděná o 0,097 s. Při výjezdu vozidla z poryvu mezi časem 3,57 s (výjezd předního konce vozidla z poryvu) a 3,69 s (výjezd zadního konce vozidla z poryvu), znovu naroste. Amplituda druhého vrcholu má velikost 21 % nestacionární amplitudy. Po výjezdu

zadního konce vozidla z poryvu potřebuje C_y čas pro ustálení přibližně 0,5 s, než poklesne na úroveň kolem kvazi-stacionárních hodnot. Pokles z výchozí úrovně úhlu náběhu 0° zaznamenal moment stáčení C_{M_z} , který na vrcholu poryvu přeběhne kvazi-stacionární hodnoty a dále roste, než v čase 3,31 s dosáhne 120 % kvazi-stacionární amplitudy. Nestacionární amplituda je zpožděná o 0,139 s za kvazi-stacionární amplitudou. Při výjezdu vozidla z poryvu dochází ve stejném časovém rozmezí jako u C_y k přeběhnutí kvazi-stacionárních hodnot a také ke změně znaménka v důsledku přeběhnutí nuly o 0,03, což je přibližně 25 % nestacionární amplitudy. Vozidlo bylo napřed natáčeno doprava kolem osy z a zde při výjezdu začne být natáčeno doleva kolem osy z. Pro ustálení potřebuje C_{M_z} opět přibližně 0,5 s. Poměrně nižší hodnoty oproti C_y a C_{M_z} zaznamenal klopící moment C_{M_x} , který z úhlu náběhu 0° klesá přes nulu s mírným zpožděním. Svého vrcholu dosáhne v čase 3,19 s, přičemž nestacionární amplituda dosáhne jen 86 % kvazi-stacionární amplitudy. Při výjezdu z poryvu opět dojde k poklesu, a tento druhý vrchol má amplitudu o velikosti 61 % nestacionární amplitudy C_{M_x} .

Tab. 2 Srovnání amplitud nestacionární a kvazi-stacionární boční síly, momentu klopení a momentu stáčení.

	C_y	C_{M_x}	C_{M_z}
Nestacionární (NS) amplituda 9°	0,252	0,030	0,122
Kvazi-stacionární (KS) amplituda 9°	0,277	0,035	0,102
Nestacionární druhý vrchol	0,053	0,018	-
Nestacionární přeběhnutí nuly	-	-	0,030
Zpoždění NS-KS	0,097 s	0,017 s	0,139 s
Zvětšení NS/KS	91 %	86 %	120 %
Rozdíl NS-KS	-0,025	-0,005	0,02

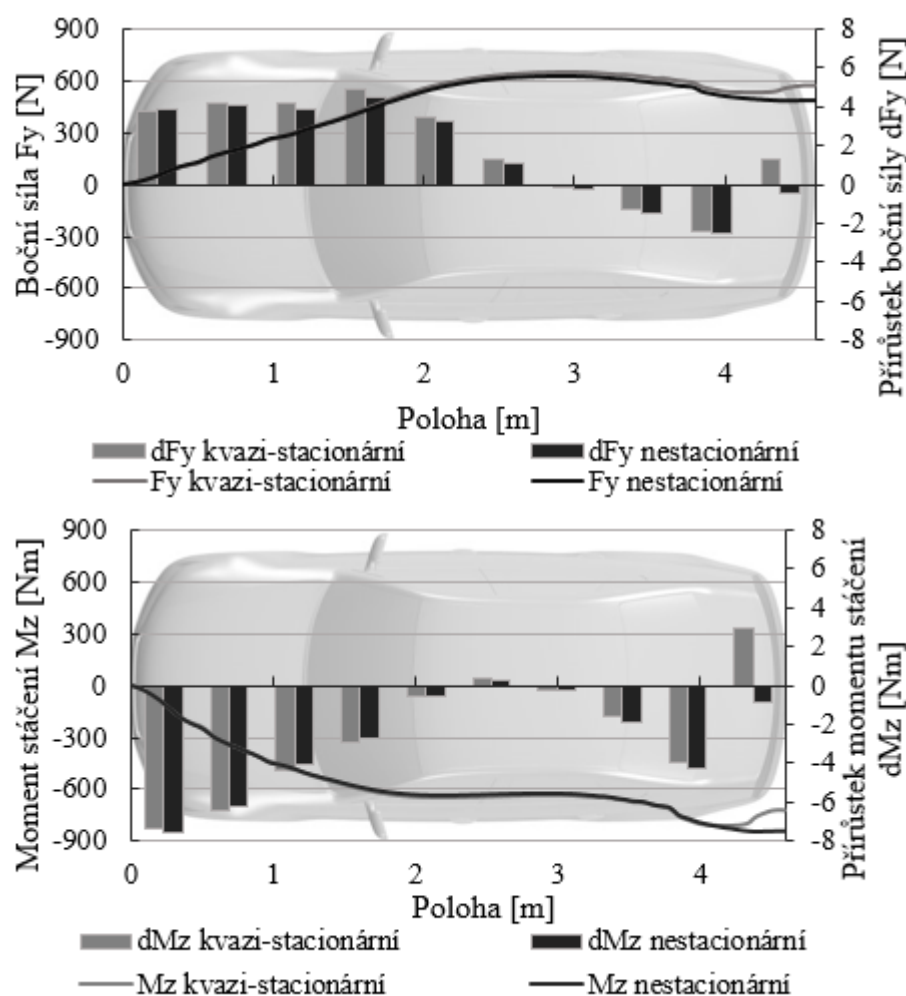
U koeficientů C_y , C_{M_x} a C_{M_z} bylo zaznamenáno nestacionární chování jak při vjezdu vozidla do poryvu, tak při jeho výjezdu z poryvu. Při dosažení vrcholu poryvu je možné sledovat u C_y a C_{M_x} , že nedosahují kvazi-stacionárních hodnot a u C_{M_z} přeběhnutí kvazi-stacionárních hodnot. Vozidlo je při vjezdu do poryvu vlivem nestacionárního momentu stáčení natáčeno více, než vlivem kvazi-stacionárního momentu stáčení. Stejně chování koeficientů C_y , C_{M_x} a C_{M_z} na vrcholu poryvu sledoval také Theissen [1]. Od výjezdu předního konce vozidla v čase 3,57 s do výjezdu zadního konce vozidla z poryvu v čase 3,69 s zaznamená C_y opětovný nárůst, C_{M_z} přeběhnutí kvazi-stacionárních hodnot a C_{M_x} opětovný pokles. Lehké přeběhnutí nestacionárního momentu stáčení a opětovný nárůst nestacionární boční síly při výjezdu vozidla z poryvu sledoval také Favre [2]. Nestacionární moment stáčení oproti kvazi-stacionárnímu, který je téměř nulový, natáčí vozidlo doleva kolem osy z. Při průjezdu vozidla poryvem bočního větru je tedy vozidlo napřed natáčeno výrazněji doprava kolem osy z a při výjezdu ještě doleva kolem osy z. Je tedy zřejmé, že při zkoumání aerodynamiky vozidla statickým přístupem může dojít k výraznému podhodnocení silových účinků. Z průběhů

aerodynamických silových účinků je zřejmé, že boční síla a moment klopení spolu souvisí, a vykazují podobné chování. Pokud se boční vítr opře do vozidla z levé strany ve směru osy y , naroste boční síla a vozidlo je tlačeno a zároveň naklopeno doprava ve směru osy y , což odpovídá zápornému momentu klopení. Kvůli podobnému chování boční síly a momentu klopení bude nadále předmětem analýzy pouze boční síla a moment stáčení.

V Tab. 2 je srovnání nestacionárních a kvazi-stacionárních amplitud průběhu boční síly C_y , momentu klopení C_{M_x} a momentu stáčení C_{M_z} při úhlu náběhu 9° , a také amplitudy druhých vrcholů a přeběhnutí při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu. Pro srovnání je zde použito zpoždění, které vyjadřuje rozdíl času nestacionární amplitudy a času kvazi-stacionární amplitudy. Dále je zde použito zvětšení, které vyjadřuje podíl nestacionární a kvazi-stacionární amplitudy v procentech, a také rozdíl nestacionárních a kvazi-stacionárních amplitud.

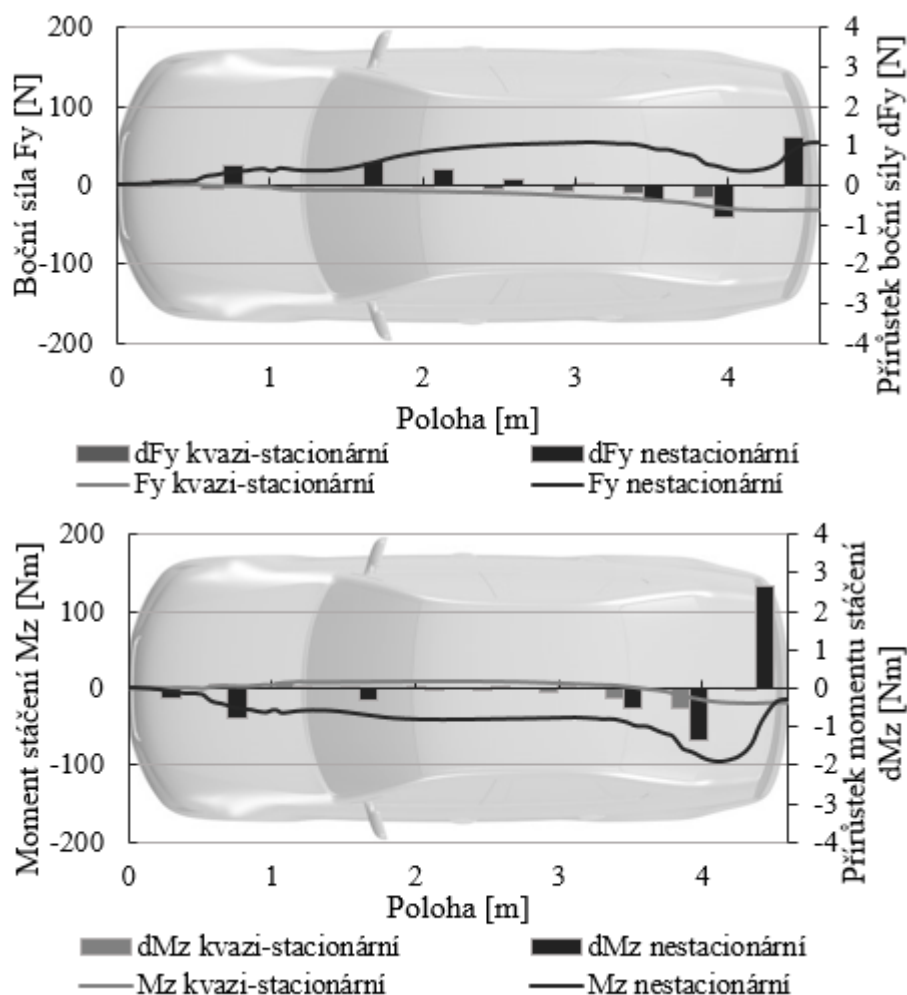
4.1.1 AKUMULOVANÉ SILOVÉ ÚČINKY

Pro zjištění rozdílů mezi nestacionárními a kvazi-stacionárními přírůstky boční síly a momentu stáčení na vrcholu poryvu při úhlu náběhu 9° , při výjezdu referenčního bodu z poryvu (úhel náběhu 0°) a při výjezdu zadní části vozidla z poryvu byl na následujících obrázcích vykreslen nestacionární a kvazi-stacionární vývoj těchto silových účinků po délce



Obr. 4.2 Nestacionární a kvazi-stacionární vývoj boční síly (nahore) a momentu stáčení (dole) po délce vozidla při úhlu náběhu 9° .

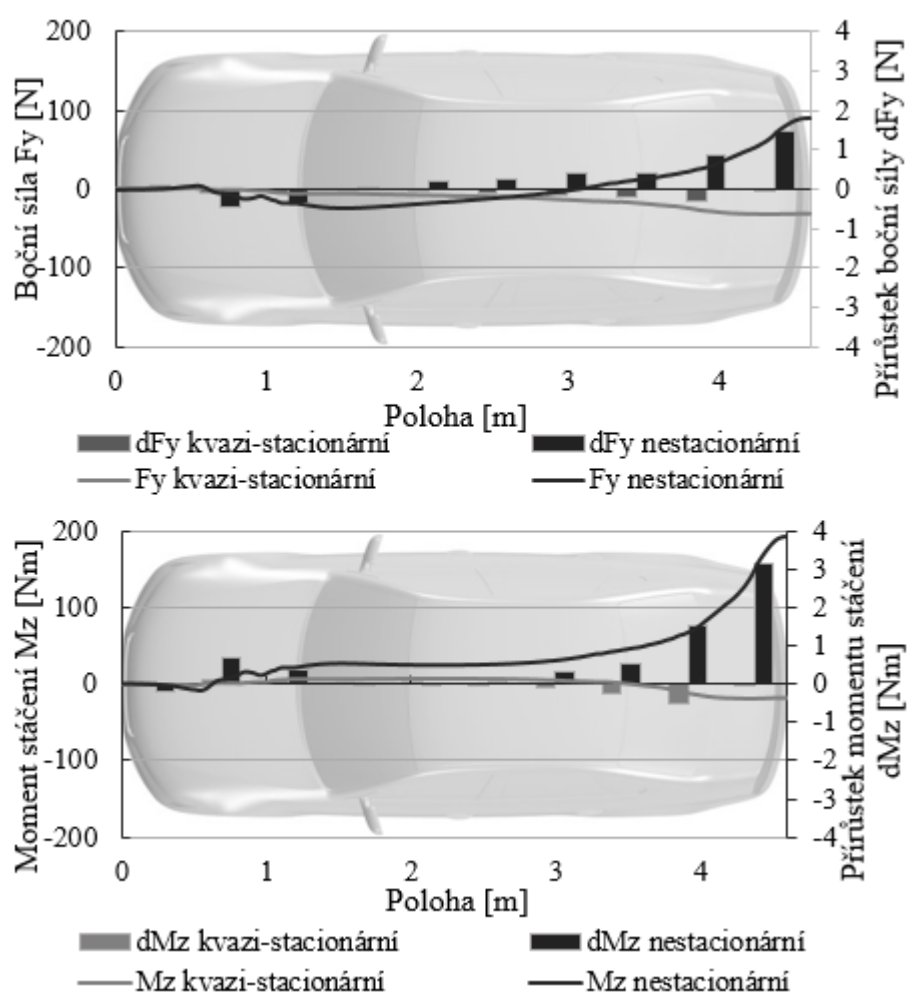
vozidla pomocí akumulované boční síly a momentu stáčení. Délka vozidla byla rozdělena na deset úseků, na kterých jsou znázorněny nestacionární a kvazi-stacionární přírůstky boční síly a momentu stáčení. Kvůli tomu, že byla data ukládána po 0,05 s, bylo nutné vykreslovat akumulovanou sílu a povrchový tlak pro úhel náběhu 9° místo v čase 3,125 s v nejbližším čase 3,15 s. Stejně tak místo času 3,625 s pro úhel náběhu 9° byl použit čas 3,6 s a místo času 3,687 s při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu byl použit čas 3,7 s.



Obr. 4.3 Nestacionární a kvazi-stacionární vývoj boční síly (nahore) a momentu stáčení (dole) po délce vozidla při výjezdu referenčního bodu z poryvu (úhel náběhu 0°).

Na vrcholu poryvu při úhlu náběhu 9° (Obr. 4.2) nejvíce boční síle přispívá přední část vozidla, zejména úsek kolem A-sloupku, zatímco momentu stáčení nejvíce přispívá první úsek na předním konci vozidla. Protože je tento úsek nejdále od referenčního bodu v polovině rozvoru, vytváří největší moment. To potvrzuje i pokles přírůstků momentu stáčení směrem ke středu vozidla a nárůst směrem k zadní části vozidla. Rozdíly mezi nestacionárními a kvazi-stacionárními přírůstky jsou malé až na přírůstek na zadním konci vozidla. Zde jsou opačná znaménka nestacionárních přírůstků boční síly i momentu stáčení oproti kvazi-stacionárním přírůstkům, a to způsobí pokles celkové boční síly a nárůst celkového momentu stáčení oproti kvazi-stacionárním hodnotám. Nestacionární jevy se zde objevují zejména na zadní části vozidla.

Další důležité místo je výjezd referenčního bodu z poryvu při úhlu náběhu 0° (Obr. 4.3), kde je nestacionární boční síla zvětšená a má opačné znaménko oproti kvazi-stacionární hodnotě. Přírůstky jsou celkově nižší než při úhlu náběhu 9° (to je také důvod změny měřítka svislých os) a opět je vidět největší rozdíl mezi nestacionárními a kvazi-stacionárními přírůstky na zadní části vozidla. Nestacionární boční síle nejvíce přispívá zadní část vozidla, dále také oblast předních kol a A-sloupku. Nestacionární moment stáčení napřed klesá kolem předních kol, A-sloupku, C-sloupku a zadních kol, ale příspěvek na zadní části vozidla, který přispíval k růstu boční síly, způsobuje nárůst nestacionárního momentu stáčení, což způsobuje, že se dostane na úroveň kvazi-stacionárního momentu stáčení.



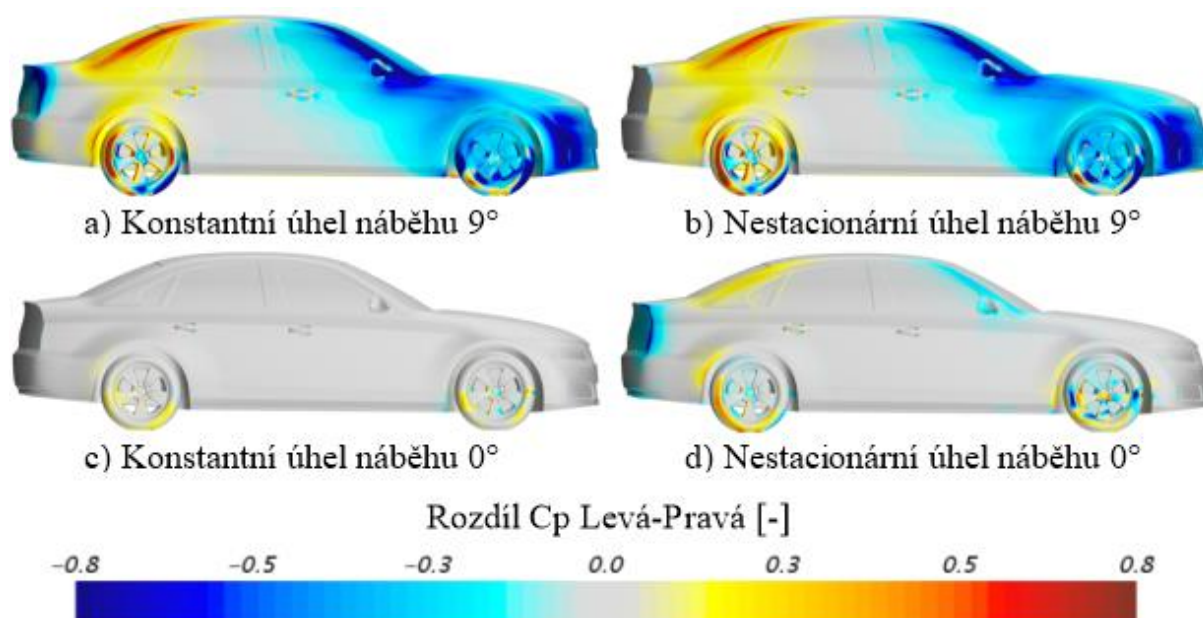
Obr. 4.4 Nestacionární a kvazi-stacionární vývoj boční síly (nahore) a momentu stáčení (dole) po délce vozidla při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu (úhel náběhu 0°).

Nestacionární boční síle při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu (Obr. 4.4) opět nejvíce přispívá zadní část vozidla, kde jsou zároveň největší rozdíly mezi nestacionárními a kvazi-stacionárními přírůstky. Nestacionární boční síla je v tomto okamžiku přibližně na vrcholu opětovného nárůstu (Obr. 4.1c) a je větší, než kvazi-stacionární boční síla. Nestacionární moment stáčení, vlivem příspěvků zadní části vozidla, přeběhl nulu, tedy změnil znaménko a výrazně narostl oproti kvazi-stacionárnímu momentu stáčení. Celkově lze říci, že nestacionární jevy, které zesilují aerodynamické silové účinky, jsou nejvýraznější na zadní části vozidla. To se shoduje se zkoumáním Theissena [1] a Wojciaka [3].

4.2 ROZLOŽENÍ TLAKU NA POVRCHU VOZIDLA

V této kapitole bylo zkoumáno nestacionárního chování aerodynamických silových účinků na zadní části vozidla, které bylo sledováno v předchozí kapitole.

Na Obr. 4.5 jsou znázorněny rozdíly nestacionárního a kvazi-stacionárního tlaku mezi levou a pravou stranou pro konstantní úhel náběhu 9° a 0° vlevo, a pro vrchol a konec poryvu (nestacionární úhel náběhu 9° a 0°) vpravo. Modrá oblast na pravé straně vozidla znamená, že tlak na pravé straně je v této oblasti nižší než na levé straně a červená znamená, že na pravé straně je tlak v této oblasti vyšší než na levé straně. Při bočním větru zprava (Obr. 4.5a, b), jsou pro kvazi-stacionární i pro nestacionární úhel náběhu 9° rozdíly tlaku patrné zejména na přední části vozidla v oblasti předního kola, A-sloupku a na zadní části vozidla v oblasti zadního kola a C-sloupku. Rozdíly tlaků na přední části vozidla jsou pro obě varianty záporné a na zadní straně převážně kladné. Oblast nízkého tlaku na pravé straně je pro obě varianty celkově výraznější. To znamená, že vozidlo je nejen tlačeno doprava ve směru osy y (kvůli výraznějšímu zápornému tlaku na přední části vozidla), ale je také natáčeno doprava kolem osy z kvůli rozdílným znaménkům na přední a zadní části vozidla.

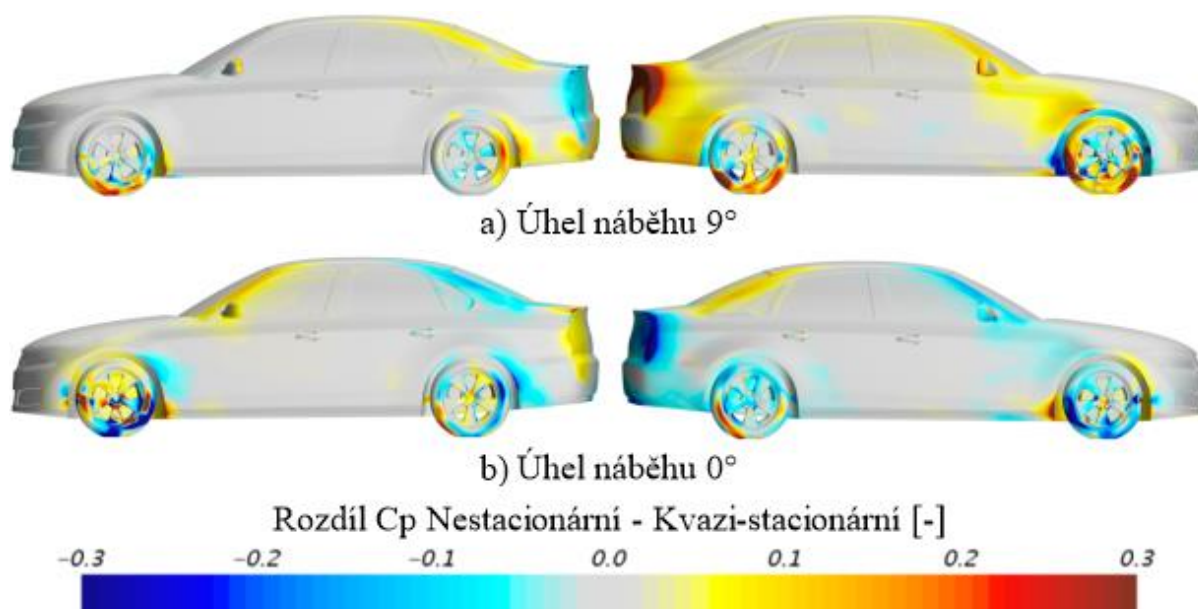


Obr. 4.5 Rozdíly nestacionárního a kvazi-stacionárního povrchového tlaku mezi levou a pravou stranou pro úhel náběhu 9° a 0° .

Nízký tlak na pravé přední části vozidla v oblasti předního kola, předního blatníku a A-sloupku je důvodem největších přírůstků boční síly a momentu stáčení na přední části vozidla při úhlu náběhu 9° , které jsou znázorněné na Obr. 4.2 nahoře. Oblast nízkého tlaku na pravém zadním rohu vozidla je pouze při konstantním úhlu náběhu 9° a odpovídá větší kvazi-stacionární boční síle a menšímu kvazi-stacionárnímu momentu stáčení na zadní části vozidla oproti nestacionárním hodnotám.

Pro srovnání a lepší přehlednost jsou na Obr. 4.6 vykresleny rozdíly mezi nestacionárním a kvazi-stacionárním povrchovým tlakem pro úhel náběhu 0° a 9° s jemnějším měřítkem pro detailnější srovnání. Modrá oblast tady znamená, že nestacionární povrchový tlak je v této oblasti nižší než kvazi-stacionární povrchový tlak a červená oblast znamená, že nestacionární

tlak je v této oblasti vyšší než kvazi-stacionární tlak. Na Obr. 4.6a je na pravé straně vozidla možné vidět rozdíl mezi kvazi-stacionárním a nestacionárním tlakem v oblasti zadního konce vozidla, zadního kola, v oblasti předního kola a A-sloupků. Na levé straně je menší rozdíl mezi kvazi-stacionárním a nestacionárním tlakem na kolech, C-sloupku a zadním konci vozidla. Rozdíly nestacionárního a kvazi-stacionárního povrchového tlaku v oblasti pravého zadního rohu vozidla sledoval také Theissen [1] a Wojciak [3].



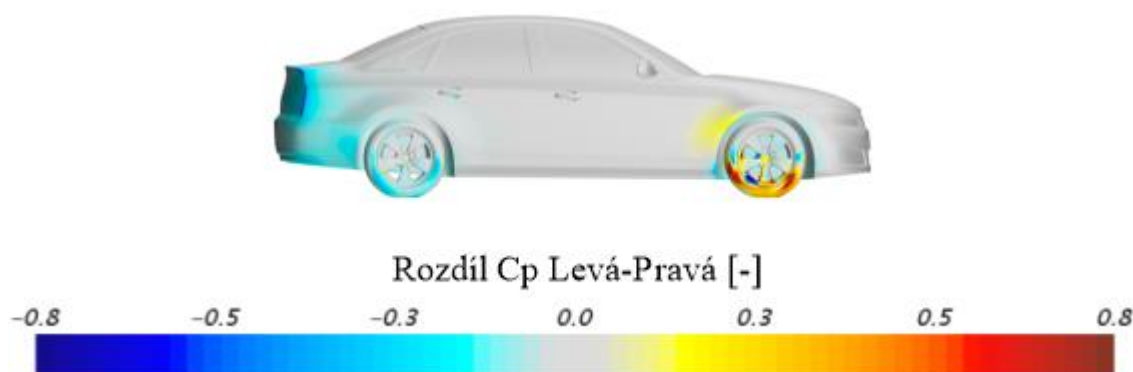
Obr. 4.6 Rozdíly mezi nestacionárním a kvazi-stacionárním povrchovým tlakem na levé a pravé straně vozidla pro úhel náběhu 9° a 0°

Pro úhel náběhu 0° (Obr. 4.5c, d) jsou rozdíly kvazi-stacionárního i nestacionárního tlaku mezi levou a pravou stranou mnohem méně výrazné. Rozložení kvazi-stacionárního tlaku je téměř symetrické, až na skvrnky na kolech, které způsobují, že je kvazi-stacionární boční síla lehce pod nulou. Rozdíly mezi levou a pravou stranou jsou celkově výraznější pro nestacionární rozložení tlaku.

Na Obr. 4.6b je vidět, že rozdíly mezi nestacionárním a kvazi-stacionárním povrchovým tlakem jsou v oblasti zadní části vozidla, zadního a předního kola, A-sloupku a C-sloupku. Oblasti nízkého nestacionárního tlaku na pravé straně v oblasti předního kola, A-sloupku a zejména na pravém zadním rohu vozidla přispívají ke zvětšené celkové nestacionární boční síle oproti kvazi-stacionární boční síle, což se shoduje s Obr. 4.3 nahoře. Nestacionární moment stáčení je velmi podobný kvazi-stacionárnímu momentu stáčení, protože proti výrazně nízkému tlaku na pravém zadním rohu vozidla působí nízký tlak na levém C-sloupku, levém zadním kole, pravém A-sloupku a pravém předním kole. To se také shoduje s přírůstky nestacionárního momentu stáčení na Obr. 4.3 dole.

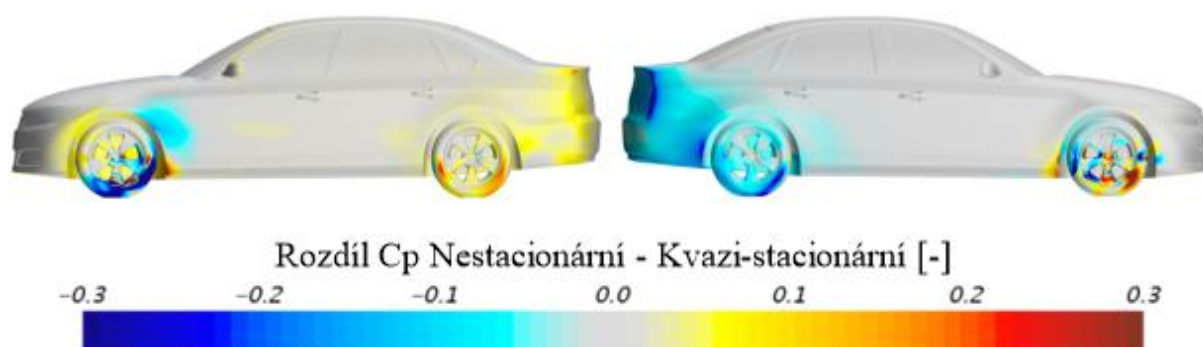
Na Obr. 4.7 je rozdíl nestacionárního povrchového tlaku mezi levou a pravou stranou při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu bočního větru. Oblast záporného rozdílu tlaků na zadní části vozidla a zadním kole vysvětluje přírůstky nestacionární boční síly na Obr. 4.4 nahoře. Dále je možné vidět výraznější kladný rozdíl tlaku na předním kole, který spolu se záporným rozdílem tlaků na zadní části vozidla přispívají ke kladnému a zvýšenému momentu stáčení oproti zápornému kvazi-stacionárnímu momentu stáčení, který je lehce pod

nulou. Na vrcholu poryvu (Obr. 4.5b) byl rozdíl tlaku na přední části záporný a na zadní části kladný, ale zde při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu dojde k otočení znamének rozdílů povrchového tlaku mezi přední a zadní částí vozidla. To vysvětluje přeběhnutí nestacionárního momentu stáčení přes nulu na Obr. 4.4 dole.



Obr. 4.7 Rozdíly nestacionárního tlaku mezi levou a pravou stranou pro výjezd zadního konce vozidla z poryvu (úhel náběhu 0°).

Pro srovnání nestacionárního a stacionárního rozložení povrchového tlaku při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu je na Obr. 4.8 vykreslen rozdíl nestacionárního a kvazi-stacionárního rozložení povrchového tlaku v čase 3,7 s. Všude, kromě zadní části vozidla v oblasti zadního kola a oblasti předního kola, je rozložení nestacionárního a kvazi-stacionárního povrchového tlaku stejné. Z Obr. 4.4 je zřejmé, že nárůst nestacionární boční síly a momentu stáčení při výjezdu vozidla z poryvu je způsoben zejména rozložením nestacionárního tlaku na zadní části vozidla.



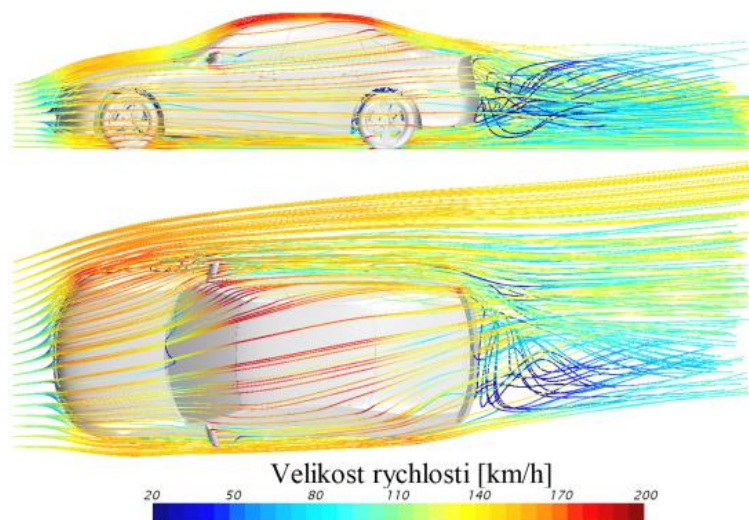
Obr. 4.8 Rozdíly mezi nestacionárním a kvazi-stacionárním povrchovým tlakem na levé a pravé straně vozidla v čase výjezdu zadního konce vozidla z poryvu (úhel náběhu 0°).

Při konstantním úhlu náběhu 9° ukazuje rozdíl tlaků mezi levou a pravou stranou (Obr. 4.5a), že je proud vzduchu urychlován na pravé straně vozidla kolem předního a zadního rohu a na levé straně kolem C-sloupku, kde jsou oblasti nízkého tlaku. Zatímco při nestacionárním úhlu náběhu 9° (Obr. 4.5c) je proud vzduchu urychlován na levé straně kolem C-sloupku a na pravé straně pouze kolem předního rohu a A-sloupku. Při konstantním úhlu náběhu 0° (Obr. 4.5c) je rozložení tlaku téměř symetrické. Při nestacionárním úhlu náběhu 0° (Obr. 4.5d) je proud vzduchu ještě stále urychlován kolem pravého A-sloupku a kolem pravého zadního rohu vozidla. Při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu (Obr. 4.7) je proud vzduchu stále urychlován kolem pravého zadního rohu vozidla, proto je nestacionární tlak na pravé straně

v oblasti za zadním kolem a na zadním kole stále snížený oproti kvazi-stacionárnímu tlaku. To se shoduje s Theissenem [1] a Wojciakem [3].

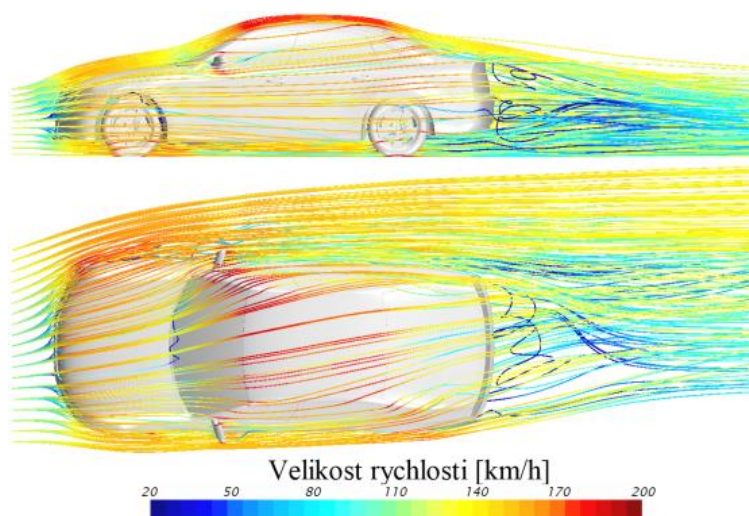
4.3 PROUDOVÉ POLE

Pro pochopení chování nestacionárního povrchového tlaku bylo zkoumáno proudové pole kolem vozidla.



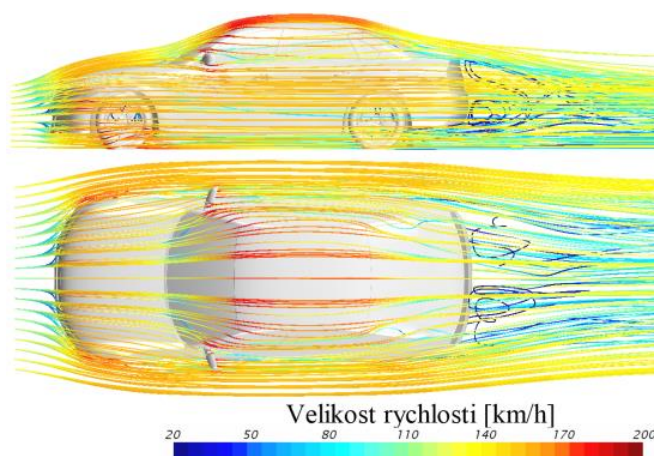
Obr. 4.9 Proudnice kolem vozidla při konstantním úhlu náběhu 9° .

Na Obr. 4.9 jsou vykresleny proudnice, které jsou trajektorií pohybu nehmotné částice, pohybující se v proudu kapaliny [8], pro konstantní úhel náběhu 9° . Barevně je znázorněna velikost rychlosti těchto částic. V tomto ustáleném stavu je proud urychlován kolem pravého předního rohu vozidla, střechy, pravého A-sloupku, levého C-sloupku a pravého zadního rohu vozidla. Dále je vidět, že do úplavu vstupuje proud ze závětrné strany. Tento závětrný proud při nenulovém úhlu natočení sledoval také Theissen [1] a Wojciak [3]. Oblasti vyšších rychlostí odpovídají oblastem nízkého povrchového tlaku.



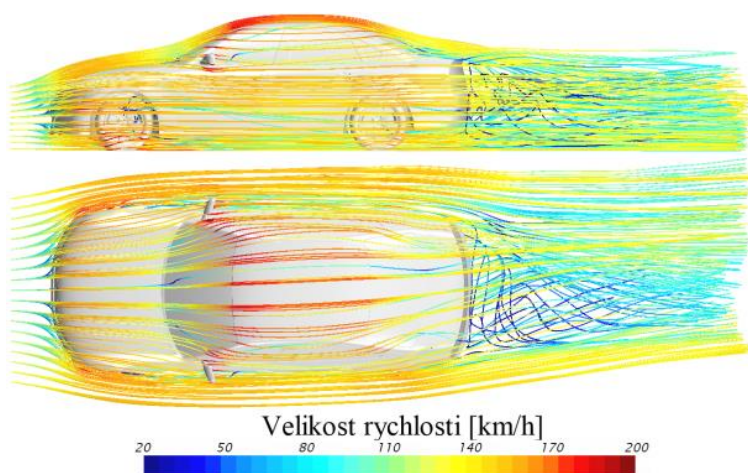
Obr. 4.10 Proudnice kolem vozidla při vjezdu referenčního bodu na vrchol poryvu (úhel náběhu 9°).

Nestacionární proudové pole při vjezdu referenčního bodu na vrchol poryvu (Obr. 4.10) ukazuje, že proudění kolem přední části vozidla je téměř stejné jako na Obr. 4.9. Výrazný rozdíl je patrný na zadní části vozidla, kde není proud urychlován kolem pravého zadního rohu vozidla a nevstupuje tedy ještě do úplavu. To vysvětluje rozdíly mezi nestacionárním a kvazi-stacionárním povrchovým tlakem na levé a pravé straně vozidla pro úhel náběhu 9° v tomto místě (Obr. 4.6b). Úplav vozidla se ještě nestihl přizpůsobit okolnímu proudění.



Obr. 4.11 Proudnice kolem vozidla při konstantním úhlu náběhu 0° .

Na Obr. 4.11 jsou proudnice kolem vozidla při konstantním úhlu náběhu 0° . Proudění kolem vozidla je symetrické, tím pádem je symetrické i urychlování proudu kolem rohů vozidla. To vysvětluje velmi malé rozdíly kvazi-stacionárního povrchového tlaku mezi levou a pravou stranou pro úhel náběhu 0° (Obr. 4.5c). Do úplavu vstupuje s nízkou rychlostí proud zpod vozidla.

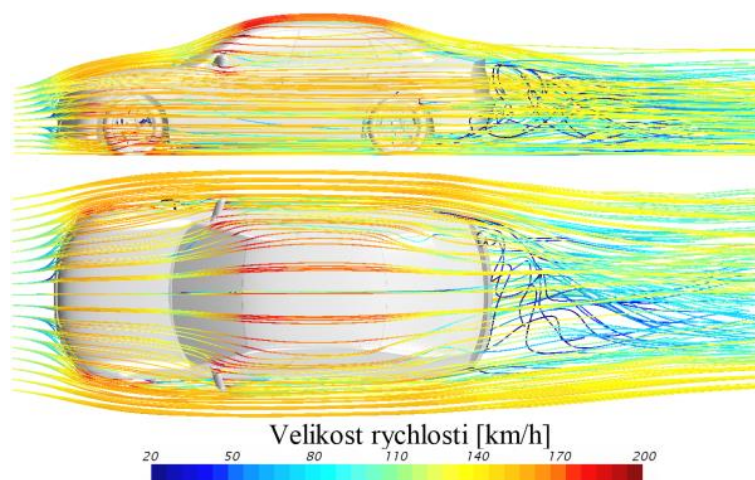


Obr. 4.12 Proudnice kolem vozidla při výjezdu referenčního bodu z poryvu (úhel náběhu 0°).

Při výjezdu referenčního bodu z poryvu (úhel náběhu 0°) na Obr. 4.12 jsou rozdíly oproti konstantnímu úhlu náběhu patrné už od začátku střechy. Největší rozdíl je v oblasti úplavu, do kterého ještě stále proudí vzduch kolem pravého zadního rohu. To odpovídá nízkému tlaku na

pravém zadním rohu vozidla (Obr. 4.5d). Opět je patrná zpožděná reakce úplavu na změnu úhlu náběhu.

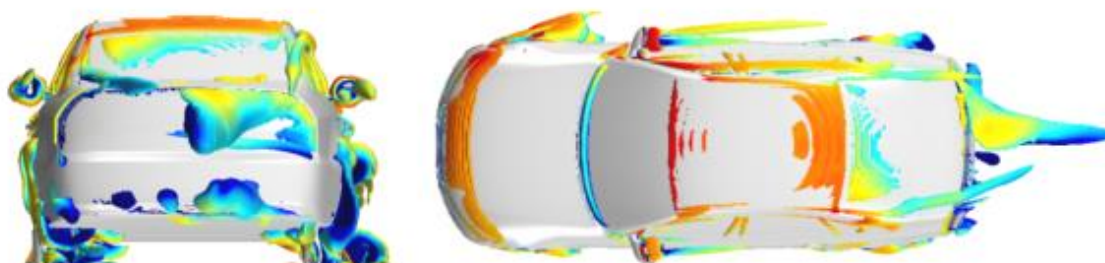
Proudové pole kolem přední části vozidla při výjezdu zadního konce z poryvu (Obr. 4.13) je už symetrické, zatímco úplav vozidla se ještě stále nepřizpůsobil a kolem pravého zadního rohu do něj stále vstupuje proud vzduchu, který způsobuje snížený tlak v tomto místě. To odpovídá rozdílu mezi nestacionárním a kvazi-stacionárním povrchovým tlakem v čase výjezdu zadního konce vozidla z poryvu (Obr. 4.8).



Obr. 4.13 Proudnice kolem vozidla při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu (úhel náběhu 0°).

Zkoumáním proudového pole bylo zjištěno, že úplav vozidla reaguje se zpožděním na změnu úhlu náběhu. Zpožděná reakce úplavu vozidla je spojena i se zpožděným poklesnutím tlaku na pravém zadním rohu vozidla, které způsobuje rozdíly mezi nestacionárními a kvazi-stacionárními aerodynamickými silovými účinky. Podobné chování úplavu při změně úhlu natočení zaznamenal také Theissen [1] a Wojciak [3].

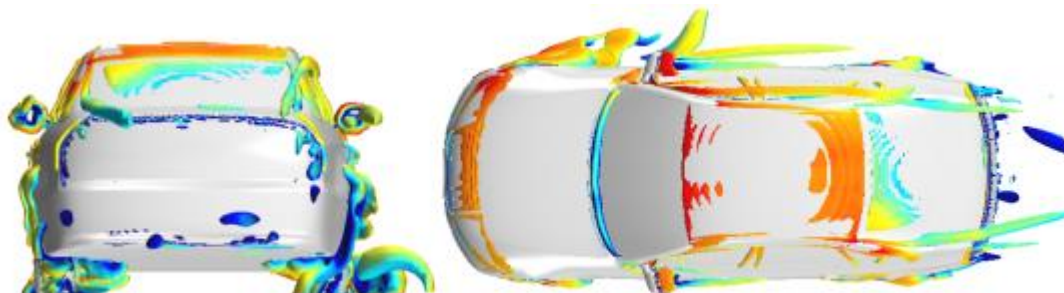
Pro další znázornění byly na obrázcích níže vykresleny izoplochy druhého invariantu gradientu rychlosti zvaného Q-kritérium s hodnotou $Q = 5000$, které znázorňují víry, tvořící se na hranách a plochách vozidla. Pro lepší grafické znázornění byla na izoplochách vykreslena rychlost. Q-kritérium podrobněji popsal Chakraborty [6].



Obr. 4.14 Proudové struktury pomocí Q-kritéria pro konstantní úhel náběhu 9° .

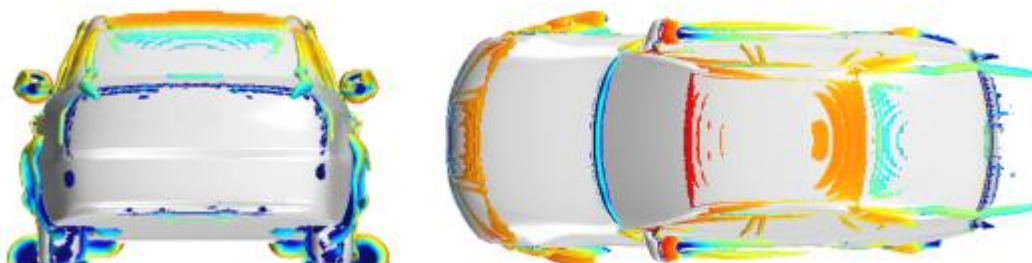
Na Obr. 4.14 jsou proudové struktury na vozidle vystaveném konstantnímu úhlu náběhu 9° . Zde jsou patrné víry, tvořící se zejména na pravém předním rohu vozidla, pravém zpětném

zrcátku, pravém A-sloupku, levém C-sloupku a na pravém zadním rohu vozidla na odtrhových hranách kufru. Místa, na kterých se tvoří víry, odpovídají oblastem nízkého tlaku. Vír na pravém zadním rohu vozidla odpovídá závětrnému proudu na Obr. 4.9. Vír na závětrném zadním rohu vozidla sledoval také Theissen [1].



Obr. 4.15 Proudové struktury pomocí Q -kritéria pro vjezd referenčního bodu na vrchol poryvu (úhel náběhu 9°).

Na Obr. 4.15 jsou znázorněny víry tvořící se na vozidle, které dosáhlo vrcholu poryvu (v polovině rozvoru). Přední část je výrazně ovlivněna bočním proudem vzduchu a na pravé straně na předním blatníku, za předním kolem, na zpětném zrcátku a A-sloupku se tvoří víry, které jsou mnohem výraznější než na levé straně. Na levé straně oproti pravé zase vzniká výrazný vír na C-sloupku. V porovnání se stavem na Obr. 4.14 se na zadním konci vozidla ještě netvoří žádné výrazné víry. Podobně jako při zkoumání proudového pole na Obr. 4.10 byla sledována zpožděná reakce úplavu na změnu úhlu náběhu.



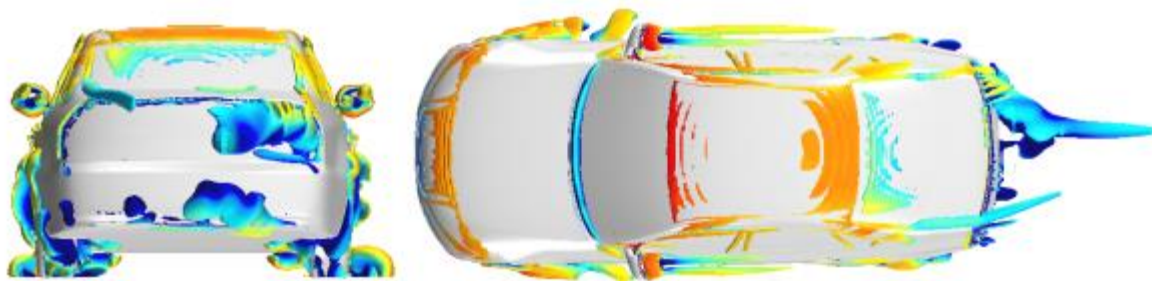
Obr. 4.16 Proudové struktury pomocí Q -kritéria pro konstantní úhel náběhu 0° .

Pro konstantní úhel náběhu 0° (Obr. 4.16) jsou proudové struktury na obou stranách vozidla symetrické. Víry se tvoří v oblastech předních kol, zpětných zrcátek, A-sloupků, C-sloupků a v oblasti úplavu se netvoří žádné výrazné víry. To se shoduje s proudovým polem na Obr. 4.11.

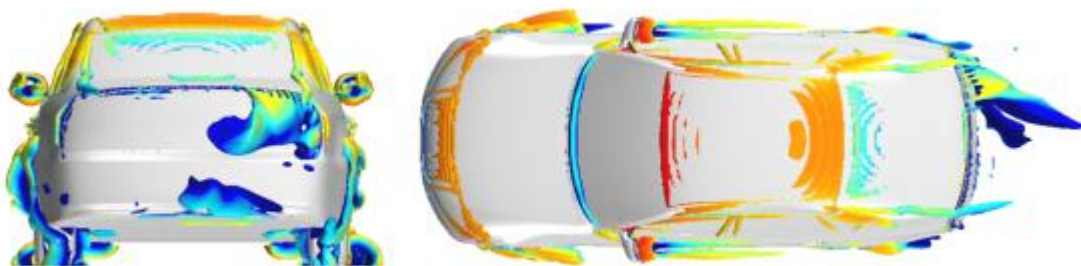
Při výjezdu referenčního bodu z poryvu na Obr. 4.18 (úhel náběhu 0°), se oproti stavu na Obr. 4.16 stále tvoří výrazný vír na levém C-sloupku, pravém A-sloupku a pravém zadním rohu vozidla. To vysvětluje rozdíly mezi nestacionárním a kvazi-stacionárním povrchovým tlakem na Obr. 4.6b. Vír na pravém zadním rohu vozidla navíc potvrzuje proud vzduchu, který tudy vstupuje do úplavu (Obr. 4.12).

Při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu (Obr. 4.17) je už proudění kolem přední části téměř symetrické, ale na pravém zadním rohu vozidla se stále tvoří vír, který už je slabší než

při výjezdu referenčního bodu z poryvu a který potvrzuje proud vzduchu vstupující do úplavu i když už je vozidlo venku z poryvu (srovnání Obr. 4.13). To vysvětluje snížený nestacionární tlak na pravé zadní části vozidla (Obr. 4.7), který při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu přispívá ke zvýšené boční síle a zvýšenému momentu stáčení.



Obr. 4.18 Proudové struktury pomocí Q -kritéria při výjezdu referenčního bodu z poryvu (úhel náběhu 0°).



Obr. 4.17 Proudové struktury pomocí Q -kritéria při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu (úhel náběhu 0°).

4.4 NESTACIONÁRNÍ MECHANIZMUS

Zkoumáním průběhů aerodynamických silových účinků, akumulovaných silových účinků, rozložení povrchového tlaku a proudového pole byl identifikován nestacionární jev na pravé zadní části vozidla. Při změně úhlu náběhu z 0° na 9° dochází ke zpožděné reakci úplavu vozidla na změnu proudění. Zpožděnou reakci úplavu sledoval také Theissen [1] a Wojciak [3].

Při vjezdu vozidla na vrchol poryvu, při změně úhlu náběhu z 0° na 9° , se přední část vozidla přizpůsobí změně úhlu náběhu a proud je kolem pravého předního rohu urychlován, což způsobí nižší tlaky na pravé přední části vozidla. Úplav vozidla ale reaguje se zpožděním a proud vzduchu ještě není urychlován kolem pravého zadního rohu vozidla, takže zde nepoklesne tlak. Nízký tlak na pravé přední části vozidla spolu s nízkým tlakem na levé zadní části přispívají ke snížené nestacionární boční síle a zvýšenému momentu stáčení oproti kvazi-stacionárním hodnotám.

Proudění kolem pravého zadního rohu se začne urychlovat se zpožděním, a při výjezdu referenčního bodu z poryvu (změna úhlu náběhu z 9° na 0°), se tvoří vír vstupující do úplavu z pravé strany, který způsobí pokles tlaku. Tento nízký tlak přispívá ke zvětšené nestacionární

boční síle a také k růstu nestacionárního momentu stáčení, který v tuto chvíli přebíhá přes nulu a mění směr natáčení vozidla.

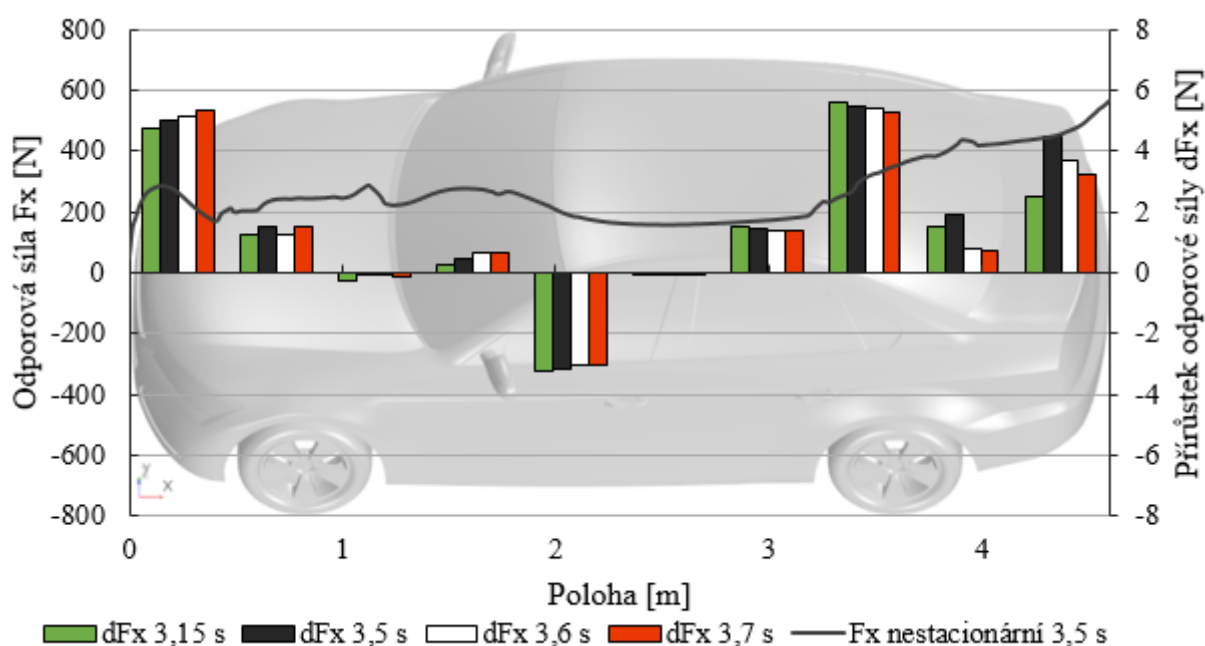
Při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu (úhel náběhu 0°) je proudění kolem přední části vozidla přizpůsobeno okolnímu proudění. Zadní část vozidla se ale ještě nestihla přizpůsobit, proud kolem pravého zadního rohu vozidla stále vstupuje do úplavu, což způsobí vyšší rychlosti a pokles tlaku. Ten přispívá ke zvýšenému nestacionárnímu momentu stáčení i zvýšené nestacionární boční síle oproti kvazi-stacionárním hodnotám.

Nestacionární chování aerodynamických silových účinků během poryvu bočního větru v této práci se shoduje se zkoumáním Theissena [1] a s nestacionárním mechanismem, který navrhl.

4.5 NESTACIONÁRNÍ CHOVÁNÍ ODPOROVÉ SÍLY

V této části bylo zkoumáno nestacionární chování odporové síly pomocí akumulované odporové síly a pomocí rozložení tlaku na povrchu vozidla.

Na Obr. 4.19 je znázorněn vývoj nestacionární odporové síly v čase 3,5 s po délce vozidla pomocí akumulované síly. Dále jsou zde znázorněny přírůstky odporové síly na deseti úsecích, na které byla rozdělena délka vozidla v čase 3,15 s (referenční bod na vrcholu poryvu), 3,5 s (při poklesu referenčního bodu v polovině amplitudy boční složky rychlosti V_y), 3,6 s (při výjezdu referenčního bodu z poryvu) a 3,7 s (při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu).



Obr. 4.19 Vývoj nestacionární odporové síly po délce vozidla v čase 3,5 s a přírůstky nestacionární odporové síly v časech 3,15 s, 3,5 s, 3,6 s a 3,7 s.

Odporová síla zaznamenává nárůst na přední části vozidla v oblasti přední části nárazníku a následný pokles v oblasti zadní části předního nárazníku. Dále odporová síla narůstá na úrovni předního kola. Prudký skok směrem do nižších hodnot zaznamená odporová síla na zadní části předních blatníků. Následuje nárůst odporové síly do poloviny čelního skla, odkud následuje další pokles. Další nárůst odporové síly byl zaznamenán v oblasti přední části

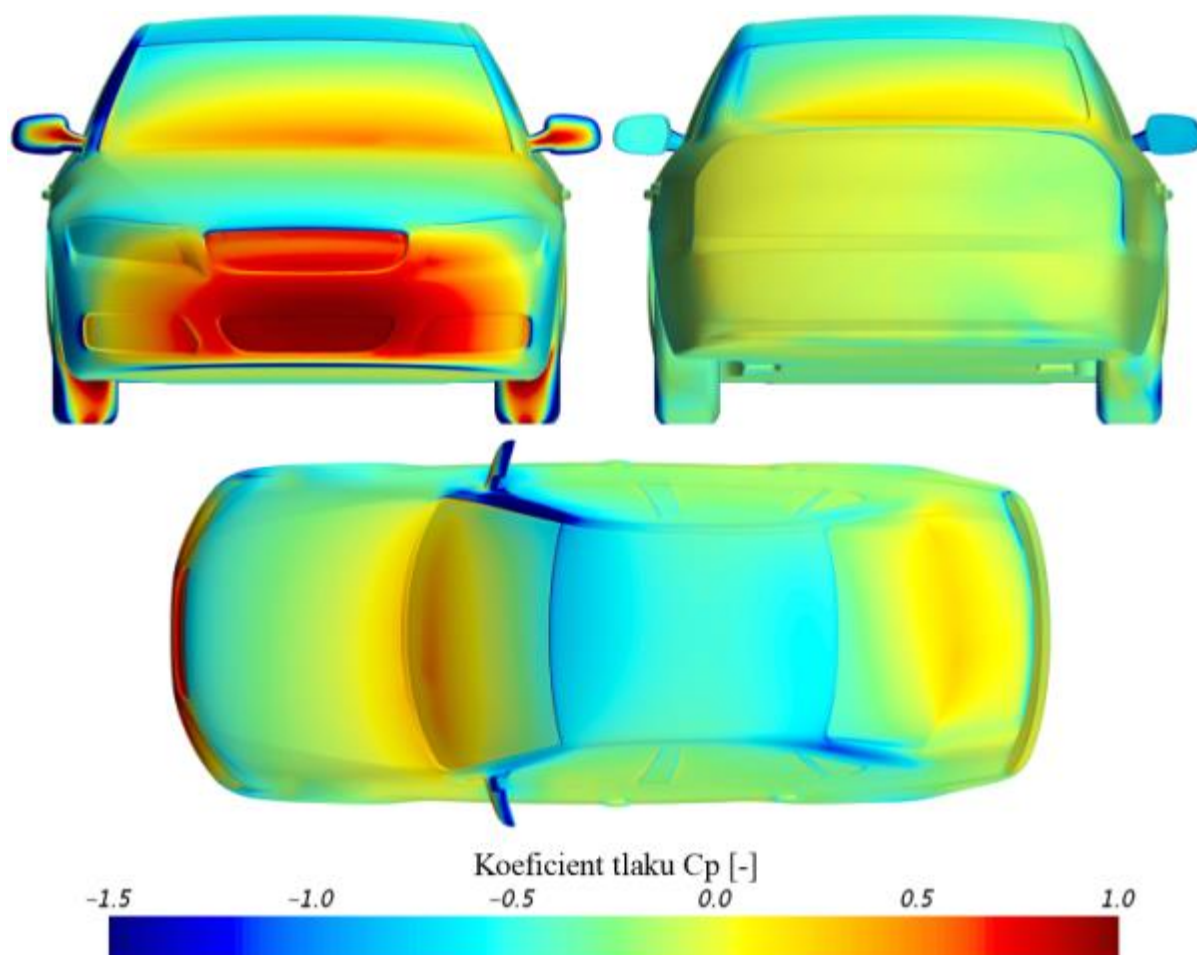
zadních blatníků, C-sloupků a zadního kola. Mírný pokles na úrovni zadní části zadního blatníku následuje další prudký nárůst v oblasti zadního konce vozidla.

Průběh akumulované odporové síly po délce vozidla se pro různé časy příliš nemění až na poslední dva úseky na zadní části vozidla, kde jsou rozdíly přírůstků v různých časech mnohem více rozdílné než na ostatních úsecích.

Na posledním úseku na zadní části vozidla jsou největší rozdíly přírůstků odporové síly v čase. Napřed narůstá až do času 3,5 s a následně klesá, což odpovídá i průběhu koeficientu odporové síly (Obr. 4.1a), který dosahuje svého maxima v čase 3,5 s. Nestacionární průběh koeficientu odporové síly je způsoben zejména nestacionárním chováním zadního konce vozidla.

4.5.1 POVRCHOVÝ TLAK

Pro další pochopení nestacionárního chování koeficientu odporové síly byl zkoumán povrchový tlak na plochách vozidla, které jsou kolmé na směr jízdy vozidla (směr hlavního proudu).



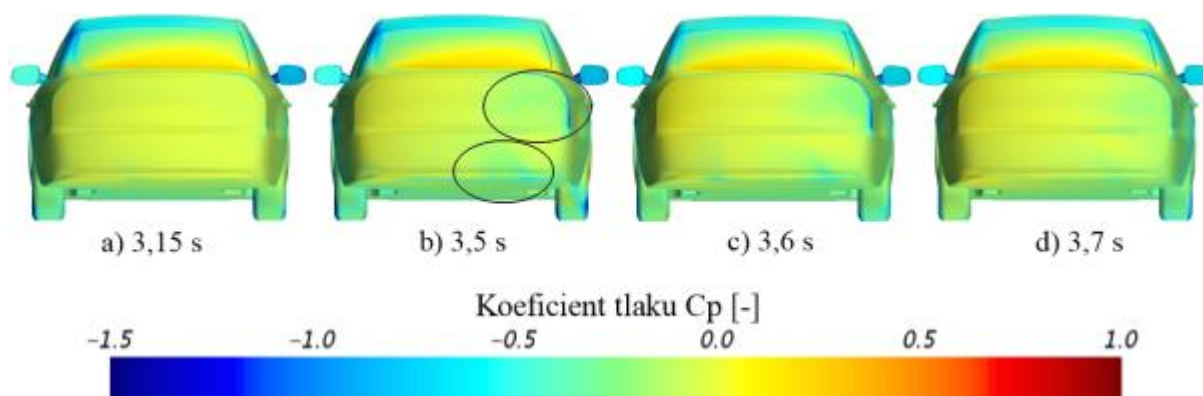
Obr. 4.20 Rozložení povrchového tlaku v čase 3,5 s v polovině amplitudy V_y .

Největší příspěvky odporové síly byly sledovány na přední části vozidla (Obr. 4.20 vlevo), kde se proud vzduchu opírá o přední nárazník a přední kola. Zároveň jsou kolem vysokého tlaku oblasti nízkého tlaku po stranách předního nárazníku a na začátku kapoty, které

odporovou sílu značně redukuje. Prudký pokles odporové síly před čelním sklem je pravděpodobně způsoben nízkým tlakem na blatníku za předními koly.

Vysoký tlak na čelním skle přispívá k růstu přibližně do poloviny čelního skla, kde začne klesat vlivem nízkého tlaku v oblasti A-sloupků a začátku střechy, který přispívá ke snížení odporové síly.

Oblast nízkého tlaku na C-sloupcích a konci střechy (Obr. 4.20 dole) odpovídá prudkému nárůstu odporové síly v oblasti C-sloupků.



Obr. 4.21 Rozložení povrchového tlaku na zadní části vozidla pro různé časy.

Větší rozdíly přírůstků odporové síly jsou patrné až na zadní části vozidla na zadních kolech (Obr. 4.21). Nízký tlak na zadní straně zadních kol, který přispívá k růstu odporové síly, napřed klesá až do času 3,5 s, poté znovu roste.

Podobné chování nízkého tlaku bylo sledováno na zadním nárazníku a v oblasti pravého zadního světla. Na Obr. 4.20 vpravo jsou na pravé části vidět dvě výraznější skvrny nízkého tlaku. Jedna ve výšce zadních světel kolem odtrhových hran a druhá skvrna vpravo na nárazníku. Vrchní skvrna nízkého tlaku je způsobena proudem vzduchu vstupujícím do úplavu kolem pravého zadního rohu a druhá skvrna proudem zpod vozidla, což odpovídá víru, který se tvoří na spodní hraně zadního nárazníku (Obr. 4.18). Když je proud vstupující do úplavu v těchto oblastech silnější, povrchový tlak na těchto hranách klesá. Nejnižší tlak a zároveň největší přírůstek odporové síly v těchto oblastech se objeví v čase 3,5 s. To vysvětluje nárůst koeficientu odporové síly C_x v tomto čase. Od tohoto času dochází k nárůstu tlaku, takže C_x zase klesá.

Při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu v čase 3,7 s C_x zase lehce naroste, ale tento nárůst je velmi malý (přibližně o 0,004), takže se nejedná o výrazné nestacionární chování ve srovnání s C_y , a C_{M_z} .

Zpožděný nárůst koeficientu odporové síly na svůj vrchol je tedy způsoben zpožděnou reakcí úplavu na změnu úhlu náběhu. Podobný průběh koeficientu odporové síly zaznamenal Favre [2], který také použil trapézový poryv větru.

5 VLIV GEOMETRIE ZADNÍ ČÁSTI VOZIDLA NA NESTACIONÁRNÍ JEVY

Pro zjištění vlivu geometrie zadní části vozidla na nestacionární chování byla provedena simulace průjezdu vozidla poryvem bočního větru také pro variantu DrivAer kombi (Obr. 3.2b). Vozidlo bylo vystaveno trapézovému poryvu větru bočního větru o frekvenci 2 Hz a amplitudě boční složky rychlosti 22,174 km/h, stejně jako sedan.

Na Obr. 5.1 jsou průběhy koeficientů aerodynamických silových účinků pro kombi. Svislými přímkami je zde znázorněn začátek růstu poryvu na předním konci vozidla, vrchol poryvu v polovině rozvoru a konec poryvu na zadním konci vozidla. Vodorovnými přímkami jsou pro srovnání znázorněny konstantní úrovně kvazi-stacionárních hodnot získaných pro konstantní úhel náběhu 9° a 0° . Pro C_y , C_{M_x} a C_{M_z} jsou vykresleny také kvazi-stacionární průběhy odvozené ze stacionárních hodnot, podobně jako u sedanu. Také bylo zachováno stejné měřítko pro koeficienty sil a stejné měřítko pro koeficienty momentů.

Chování koeficientů aerodynamických silových účinků je pro kombi velice podobné jako pro sedan. U kombi byly také zaznamenány rozdíly mezi nestacionárními a kvazi-stacionárními průběhy, zejména při dosažení vrcholu poryvu a při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu.

Co se týče koeficientů sil, tak C_x u kombi dosahuje vyšších hodnot než u sedanu. C_y má u kombi také větší amplitudu než sedan, zatímco u C_z dosahuje kombi nižších hodnot. Pro koeficienty momentů jsou tyto rozdíly menší. Větší amplitudu C_{M_z} zaznamenal sedan. U kombi se amplituda C_{M_z} nachází těsně po dosažení vrcholu poryvu na rozdíl od sedanu, kde je amplituda nestacionárního C_{M_z} zpožděna oproti kvazi-stacionární amplitudě o 0,139 s. Lehce vyšší nestacionární amplitudu C_{M_x} dosáhlo kombi. Hodnoty C_{M_y} jsou u obou variant velmi podobné.

Koeficient C_x zaznamenal jen malé výchylky směrem k vyšším hodnotám. C_z také během poryvu jen lehce narostl směrem k nule, což odpovídá lehkému poklesu přítlaku. Průběh C_{M_y} během poryvu odpovídá naklonění vozidla dopředu. Sice přesáhne kvazi-stacionární hodnoty, ale tyto výchylky jsou jen malé. Podobně jako u sedanu můžou být průběhy těchto koeficientů považovány za nekritické, zatímco koeficienty boční síly, momentu klopení a momentu stáčení zaznamenaly větší výchylky podobně jako u sedanu.

Následuje srovnání amplitud boční síly, momentu klopení a momentu stáčení těchto dvou variant.

V Tab. 3 je srovnání nestacionárních a kvazi-stacionárních amplitud boční síly, momentu klopení a momentu stáčení. Dále je zde také srovnání nestacionárních amplitud při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu.

U sedanu byla sledována větší nestacionární amplituda momentu stáčení než u kombi, zatímco kombi vykazuje vyšší nestacionární amplitudu boční síly. Theissen [1], Wojciak [3] a Favre [2] také sledovali, že vozidlo s největší boční silou má nejmenší moment stáčení a že má kombi největší amplitudu boční síly a nejmenší amplitudu momentu stáčení. Nestacionární amplituda momentu klopení je lehce větší u kombi než u sedanu.

U obou variant jsou rozdíly mezi nestacionárními a kvazi-stacionárními amplitudami záporné pro boční sílu a moment klopení, což znamená, že jsou kvazi-stacionární amplitudy větší než

nestacionární, a kladné u momentu stáčení, kde jsou nestacionární amplitudy větší, než kvazi-stacionární amplitudy. Kombi má tyto rozdíly pro boční sílu a moment stáčení menší než sedan. Rozdíl nestacionární a kvazi-stacionární amplitudy pro moment klopení je velmi podobný, lehce vyšší však pro kombi. Kombi má tedy méně výrazné nestacionární chování oproti sedanu.

Tab. 3 Srovnání amplitud pro sedan a kombi.

	Sedan			Kombi		
	C_y	C_{M_x}	C_{M_z}	C_y	C_{M_x}	C_{M_z}
Nestacionární (NS) amplituda 9°	0,252	0,030	0,122	0,321	0,038	0,101
Kvazi-stacionární (KS) amplituda 9°	0,277	0,035	0,102	0,337	0,045	0,088
Nestacionární amplituda druhý vrchol	0,053	0,018	-	0,051	0,015	-
Nestacionární amplituda přeběhnutí nuly	-	-	0,030	-	-	0,025
Zpoždění NS-KS	0,097 s	0,017 s	0,139 s	0,133 s	0,257 s	0,017 s
Zvětšení NS/KS	91 %	86 %	120 %	95 %	84 %	115 %
Rozdíl NS-KS	-0,025	-0,005	0,02	-0,016	-0,007	0,013

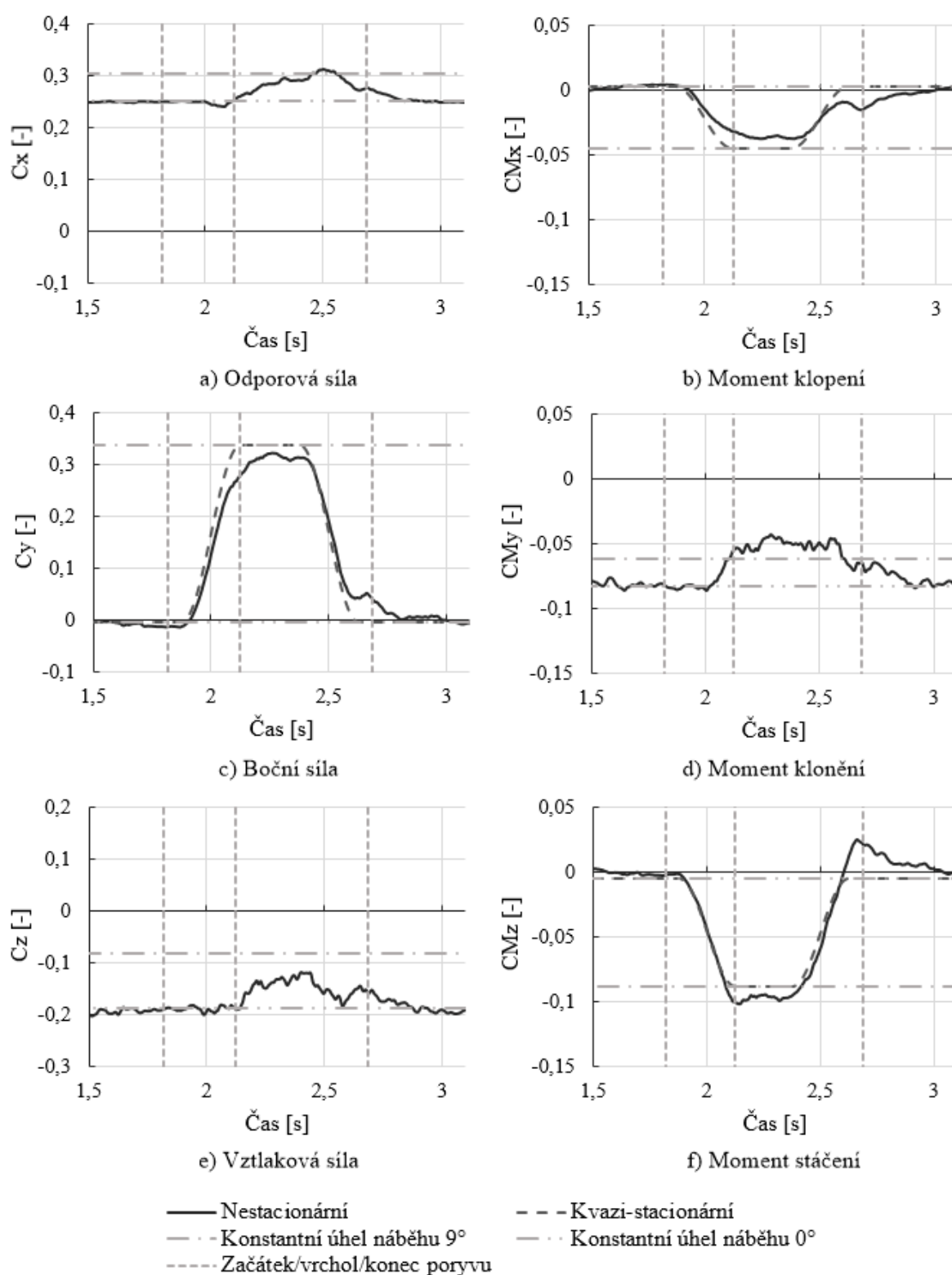
Větší rozdíly nestacionárních a kvazi stacionárních amplitud boční síly a momentu stáčení sledovali také Theissen [1], Favre [2] a Wojciak [3], kteří se shodují i na tom, že méně výrazné nestacionární chování se objevuje u kombi a výraznější u sedanu.

Podíl nestacionárních a kvazi-stacionárních amplitud neboli zvětšení nestacionární amplitudy oproti kvazi-stacionární je u sedanu větší pro moment klopení a stáčení než u kombi, zatímco zvětšení boční síly je větší u kombi. Největšího zvětšení dosahují momenty stáčení u obou variant.

Kombi zaznamenalo větší časové zpoždění nestacionárních amplitud za kvazi-stacionárními pro boční sílu a moment klopení, než bylo zaznamenáno pro sedan, zatímco zpoždění momentu klopení je výrazně větší pro sedan. Celkově největší zpoždění bylo sledováno u momentu klopení pro kombi.

Vzhledem k rozdílnému typu poryvu se časové zpoždění oproti Theissenovi [1] a Wojciakovi [3] výrazně liší. Oba sledovali větší časové zpoždění pro sedan a menší pro kombi. U trapézového poryvu použitého v této práci, měly aerodynamické silové účinky více času pro nárůst po dosažení vrcholu poryvu.

Co se týče nestacionárních jevů při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu, jsou amplitudy druhých vrcholů a přeběhnutí velmi podobné pro obě varianty, přesto však vyšší pro sedan.



Obr. 5.1 Průběhy koeficientů aerodynamických silových účinků pro DrivAer kombi.

Srovnáním průběhů aerodynamických silových účinků pro sedan a kombi, bylo zjištěno, že nestacionární jevy se objevují také u varianty kombi. Sedan vykazuje celkově výraznější nestacionární chování než kombi. Kombi vykazuje výrazně větší amplitudu boční síly než sedan. Vozidlo s větší amplitudou momentu stáčení má menší amplitudu boční síly a naopak.

Rozdíly nestacionárních a kvazi-stacionárních amplitud boční síly a momentu stáčení jsou větší pro kombi než pro sedan. Největší zvětšení bylo sledováno u momentu stáčení pro obě varianty, větší pro sedan. Kombi zaznamenalo větší časové zpoždění pro boční sílu a moment klopení než pro sedan.

ZÁVĚR

Pro pochopení nestacionárního aerodynamického chování reálné geometrie vystavené poryvu bočního větru, byla provedena CFD simulace průjezdu vozidla poryvem bočního větru pomocí časově závislých okrajových podmínek v programu STAR-CCM+ 11.06.010. Pro simulace byla použita geometrie DrivAer.

Napřed byla vytvořena funkce popisující průběh boční složky rychlosti, inspirována zkoumáním Favreho [2], která zajistí průchod poryvu větru výpočetním objemem.

Dále byl zkoumán rozdíl při použití kontinuálního poryvu a při použití trapézového poryvu se stejnou frekvencí a amplitudou. Bylo zjištěno, že při použití kontinuálního poryvu s frekvencí 2 Hz a amplitudou boční složky rychlosti $V_{y_{max}} = 22,174$ km/h dochází k potlačení některých nestacionárních jevů, například pro nestacionární moment stáčení při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu. Pro další výpočty byl použit trapézový poryv s frekvencí 2 Hz, amplitudou boční složky rychlosti $V_{y_{max}} = 22,174$ km/h, která odpovídá úhlu náběhu 9° . Vozidlo projíždějící rychlostí $V_x = 140$ km/h trapézovým poryvem bylo vystaveno konstantnímu úhlu náběhu 0° , následoval nárůst úhlu náběhu na 9° , výdrž 0,25 s a pokles zpět na úhel náběhu 0° .

Průběhy nestacionárních koeficientů aerodynamických silových účinků byly srovnány s hodnotami získanými při konstantních úhlech náběhu, ze kterých byly vytvořeny kvazi-stacionární průběhy.

Výchytky koeficientů C_x , C_z a C_{M_y} mohou být kvůli malým výchytkám a také kvůli malému vlivu na pohyb vozidla při průjezdu poryvem bočního větru považovány za nekritické. Velké výchytky byly sledovány u koeficientů C_y , C_{M_x} a C_{M_z} , které mohou výrazněji ovlivnit dynamiku vozidla při průjezdu poryvem bočního větru.

Nestacionární chování C_y , C_{M_x} a C_{M_z} bylo zaznamenáno jak při vjezdu vozidla do poryvu, tak i při výjezdu vozidla z poryvu. Na vrcholu poryvu bylo možné sledovat u C_y a C_{M_x} , že nedosahují kvazi-stacionárních hodnot a u C_{M_z} přeběhnutí kvazi-stacionárních hodnot. Také při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu zaznamenal C_y opětovný nárůst, C_{M_z} přeběhnutí kvazi-stacionárních hodnot a C_{M_x} opětovný pokles.

Zkoumáním průběhů akumulované boční síly a momentu stáčení byly identifikovány nestacionární jevy na zadní části vozidla a následně vysvětleny zkoumáním tlaku na povrchu vozidla a proudového pole kolem vozidla.

Na pravém zadním rohu vozidla byl sledován rozdíl mezi nestacionárním a kvazi-stacionárním povrchovým tlakem jak při vjezdu vozidla na vrchol poryvu, tak při výjezdu vozidla z poryvu. Tento rozdíl je způsoben zpožděnou reakcí úplavu na změnu úhlu náběhu.

Při vjezdu referenčního bodu (v polovině rozvoru) na vrchol poryvu se proudění kolem přední části vozidla přizpůsobí, zatímco úplav vozidla reaguje se zpožděním a nestihne se zde vytvořit závětrný proud vstupující do úplavu ze závětrné strany, který se při konstantním úhlu náběhu vyskytuje. Urychlení proudu kolem pravého předního rohu vozidla způsobí nízký tlak na pravé přední části vozidla, který spolu s nízkým tlakem na levém C-sloupku přispívají ke snížení nestacionární boční síly a zvýšenému momentu stáčení oproti kvazi-stacionárním hodnotám.

Při výjezdu referenčního bodu z poryvu se úplav vozidla ještě nestihl přizpůsobit úhlu náběhu 0° , zatímco přední část už téměř ano. Nízký tlak na pravém zadním rohu vozidla, kudy stále vstupuje proud vzduchu do úplavu, přispívá ke zvýšené boční síle a k růstu momentu stáčení, který v tuto chvíli přebíhá přes nulu a mění směr natáčení vozidla.

Při výjezdu zadního konce vozidla z poryvu stále do úplavu vstupuje proud kolem pravého zadního rohu vozidla, zatímco proudění kolem přední části už je symetrické. Nízký tlak na pravém zadním rohu vozidla přispívá ke zvýšenému nestacionárnímu momentu stáčení a zvýšené nestacionární boční síle oproti kvazi-stacionárním hodnotám.

Dále bylo zkoumáno nestacionární chování odporové síly, která zaznamenala během poryvu pozvolný nárůst od vjezdu referenčního bodu na vrchol poryvu a svého maxima dosáhla při poklesu v polovině amplitudy boční složky rychlosti V_y . Pomocí akumulované odporové síly a povrchového tlaku vozidla bylo zjištěno, že nestacionární chování koeficientu odporové síly je také způsobeno zpožděnou reakcí úplavu na změnu úhlu náběhu. Ta způsobuje zpožděné vytvoření víru na odtrhových hranách na pravé části kufru a víru tvořícího se na spodní hraně zadního nárazníku. V místech, kde se tvoří víry poklesne tlak, který spolu s nízkým tlakem na zadních kolech dosáhne svého minima v čase 3,5 s. V tomto čase se také nachází vrchol koeficientu odporové síly.

V poslední části byl zkoumán vliv geometrie zadní části vozidla na nestacionární jevy. Pro srovnání byla spočítána simulace průjezdu trapézovým poryvem také pro variantu kombi. Srovnáním sedanu a kombi bylo zjištěno, že nestacionární jevy sledované u sedanu se objevují také u kombi. Sedan vykazuje oproti kombi výraznější nestacionární chování. Sedan má větší amplitudu momentu stáčení, zatímco kombi má větší amplitudu boční síly. Celkově byly u momentu stáčení sledovány největší rozdíly mezi nestacionárními a kvazi-stacionárními amplitudami, tedy nejvýraznější nestacionární chování, větší u sedanu. Kombi zase zaznamenalo větší časové zpoždění pro boční sílu a moment klopení.

Na závěr lze tedy říct, že při hodnocení citlivosti vozidla na boční vítr za použití stacionárních výpočtů při konstantních úhlech náběhu, dochází k výraznému podhodnocení silových účinků. Použití časově závislých okrajových podmínek je dalším krokem k lepšímu posuzování citlivosti vozidla na boční vítr.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] THEISSEN, Pascal. *Unsteady Vehicle Aerodynamics in Gusty Crosswind* [online]. 2012, München [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1096026>. Dizertační práce. Technische Universität München.
- [2] FAVRE, T. Aerodynamics simulations of ground vehicles in unsteady crosswind [online]. Stockholm, 2011 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://www.divaportal.org/smash/get/diva2:461388/FULLTEXT01.pdf>
- [3] WOJCIAK, Johannes. *Quantitative Analysis of Vehicle Aerodynamics during Crosswind Gusts* [online]. München, 2012 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1095887/1095887.pdf>. Dizertační práce. Technische Universität München.
- [4] TSUBOKURA, M., T. NAKASHIMA, K. KITOH a Y. SASAKI. Development of an Unsteady Aerodynamic Simulator Using Large-Eddy Simulation Based on High-Performance Computing Technique. *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* [online]. 2009, s. 168-178 [cit. 2017-05-19]. DOI: 10.4271/2009-01-0007. Dostupné z: <http://papers.sae.org/2009-01-0007/>
- [5] FAVRE, Tristan. *Numerical Investigation of Unsteady Crosswind Aerodynamics for Ground Vehicles* [online]. Stockholm, 2009 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:273411/FULLTEXT01.pdf>. KTH.
- [6] CHAKRABORTY, Pinaki, s. BALACHANDAR a Ronald J. ADRIAN. *On the relationships between local vortex identification schemes. Journal of Fluid Mechanics.* 2005, 2005(535), 189–214. DOI: 10.1017/S0022112005004726.
- [7] FORBES, David C., Gary J. PAGE a Martin A. PASSMORE. *A Fully Coupled, 6 Degree-of-Freedom, Aerodynamic and Vehicle Handling Crosswind Simulation using the DrivAer Model.* *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.* 2016, 2016(2), 710-722. DOI: 10.4271/2016-01-1601.
- [8] *Definiton of Streamlines.* In: *National Aeronautics and Space Administration* [online]. Washington, D.C.: NASA, 2015 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/stream.html>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	[m ²]	Průmět čelní plochy na rovinu za vozidlem
C _F	[-]	Koeficient aerodynamické síly
CFD	[-]	Computational Fluid Dynamics
C _M	[-]	Koeficient aerodynamického momentu
C _{Mx}	[-]	Koeficient momentu klopení
C _{My}	[-]	Koeficient momentu klonění
C _{Mz}	[-]	Koeficient momentu stáčení
C _x	[-]	Koeficient odporové síly
C _y	[-]	Koeficient boční síly
C _z	[-]	Koeficient vztlakové síly
DDES	[-]	Delayed Detached Eddy Simulations
DES	[-]	Detached Eddy Simulations
F	[N]	Síla
l	[m]	Rozvor
LES	[-]	Large Eddy Simulations
M	[N·m]	Moment
Q	[-]	Druhý invariant gradientu rychlosti
RANS	[-]	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
t	[s]	Čas
t ₀	[s]	Čas začátku poryvu
t _{nárůst}	[s]	Čas nárůstu amplitudy
t _{poryv}	[s]	Čas poryvu
V	[m·s ⁻¹]	Rychlost
V _x	[m·s ⁻¹]	Podélná složka rychlosti
V _y	[m·s ⁻¹]	Boční složka rychlosti
V _{y_{max}}	[m·s ⁻¹]	Amplituda boční složky rychlosti
x	[m]	Poloha
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota tekutiny
β	[°]	Úhel náběhu
ω	[Hz]	Frekvence